ECOLOGÍA
La importancia de los polinizadores

BIOLOGÍA DEL DESARROLLO
La placenta, un órgano multifunción

HISTORIA
Los prisioneros que cambiaron el mundo

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Agosto 2018 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de Scientific American

LA HISTORIA SECRETA DEL SOL

Nuevas investigaciones revelan su pasado, presente y posible futuro

INFORME ESPECIAL

LAS GRANDES PREGUNTAS DE LA CIENCIA

¿Qué es el espaciotiempo?
¿Qué es la consciencia?
¿Cómo se originó la vida?



6,90 EUROS

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

LA HISTORIA SECRETA DEL SOL | LAS GRANDES PREGUNTAS DE LA CIENCIA | FUNCIONES DE LA PLACENTA

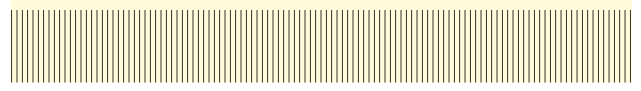
AGOSTO 2018 N.° 503

INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA

Agosto 2018, Número 503

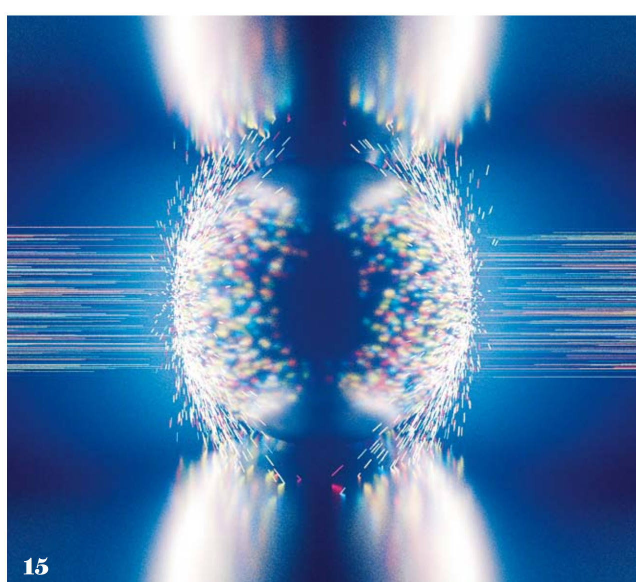
20

ARTÍCULOS



THIERRY LEGAULT *(tránsito solar de la Estación Espacial Internacional)*







INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

Varias investigaciones recientes han comenzado a desentrañar el pasado del Sol y sus relaciones de parentesco con otras estrellas. Los resultados están dibujando una historia del sistema solar mucho más compleja de lo que se pensaba hasta ahora, al tiempo que aportan valiosa información sobre los procesos de formación estelar en otras partes de la galaxia. Esta imagen de nuestra estrella fue tomada en 2014 por el Observatorio de Dinámica Solar, de la NASA.



redaccion@investigacionyciencia.es



Marzo y abril de 2018

DILEMA AGRÍCOLA

En «La revolución del fitobioma» [Investigación y Ciencia, marzo de 2018], Marla Broadfoot expone las investigaciones que buscan luchar contra el hambre por medio del fitobioma, la compleja red que conforman los cultivos y otros factores ambientales, como las comunidades microbianas. Es sin duda positivo que la ciencia agraria adopte un enfoque más holístico. Sin embargo, sorprende que la autora sostenga que, en los próximos años, será necesario aumentar la producción agrícola mundial en un 70 por ciento —como concluyó en 2009 la FAO— para afrontar el crecimiento de la población y el aumento en el consumo de carne.

Antes de incrementar las cosechas, deberíamos intentar reducir las ineficiencias en la producción y la distribución de alimentos. Se calcula que en torno a un tercio de la comida de todo el mundo acaba en la basura, y la FAO ha estimado que el 6,7 por ciento de los gases de efecto invernadero globales se deben al desperdicio de alimentos. Un informe de junio de 2010 del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente defendió un cambio mundial hacia una dieta basada en plantas para luchar contra el hambre, la pobreza y el cambio climático, algo que además mejoraría la salud de las personas. De hecho, China ya ha reconocido la amenaza que representa el creciente consumo de carne para el entorno y para la salud y ha desarrollado una campaña para reducirlo en un 50 por ciento de aquí a 2030.

Olga Syraya
Düsseldorf

El artículo de Broadfoot ignora en gran medida una consecuencia importante del aumento de la producción agrícola: la bajada del precio de los cultivos. A menos que estos sean capaces de proporcionar más ingresos a pesar de la caída del precio, un mayor rendimiento puede acabar provocando más daño que beneficio para los agricultores.

Por otro lado, aunque la autora concluye con una breve mención a los problemas relacionados con el reparto de comida a quienes padecen hambre, su observación oculta otro punto clave: si dejásemos de dar nuestros cultivos al ganado, a los fermentadores de etanol y a los dictadores, es probable que ya pudiésemos alimentar a todo el planeta sin necesidad de aumentar la producción, al tiempo que reduciríamos la presión que la agricultura intensiva crea sobre el entorno. A veces, los problemas humanos requieren soluciones humanas.

Geoff Hart

BILIS Y DIABETES

En «Cirugía de acortamiento intestinal para la diabetes de tipo 2» [Investigación y Ciencia, abril de 2018], Francesco Rubino incluye la bilis entre los factores responsables del éxito de dicha cirugía para controlar la diabetes de tipo 2. Sin embargo, son confusos los vínculos entre la vesícula biliar, la bilis y la glucosa. Para aquellos de nosotros a quienes se nos ha extirpado la vesícula biliar, ¿la falta del órgano tiende a aumentar o a disminuir la cantidad de glucosa en sangre?

Bill y Mary Stiles

Responde Rubino: *A pesar del claro papel de la bilis y de los ácidos biliares (componentes de la bilis que actúan como moléculas de señalización) en la regulación metabólica, no hay pruebas clínicas de que la extirpación de la vesícula biliar produzca efectos sustanciales en la diabetes, ni positivos ni negativos. De hecho, los niveles de glucosa en sangre suelen permanecer casi iguales. Esto no debería sorprendernos, ya que la función principal de la vesícula biliar es almacenar la bilis, no producirla —como hace el hígado—, y la pérdida de dicha función generalmente es compensada por el conducto biliar principal y las demás vías biliares.*

La cirugía gastrointestinal puede cambiar las características de la bilis y de los ácidos biliares, los cuales pueden afectar al metabolismo de la glucosa. No en vano, al alterar el sitio y el momento de la mezcla de bilis y nutrientes en el interior del intestino, esta cirugía influye en la interacción entre los ácidos biliares y otros componentes del contenido intestinal, lo que modifica sus propiedades químicas. Por un lado, ello puede influir en la capacidad de los ácidos biliares para interactuar con receptores celulares específicos en el revestimiento intestinal. Pero, además, un cambio en los ácidos biliares puede afectar su reabsorción en los segmentos inferiores del intestino delgado, y de esta manera influir en sus niveles en sangre. A su vez, eso puede cambiar la forma en que estas moléculas señalan a otros tejidos implicados en la regulación metabólica, como los del hígado. Allí los ácidos biliares en circulación actúan como un mecanismo de retroalimentación que modula su propia síntesis. Sin embargo, y como mencionaba en el artículo, el efecto de la cirugía sobre la diabetes probablemente se deba a una combinación de cambios en los mecanismos gastrointestinales, no a los ácidos biliares por sí solos.

Erratum corrige

En el artículo **Epidemias que varían con el clima** [por Lois Parshley; Investigación y Ciencia, julio de 2018] se afirmaba que el alza de las temperaturas ha expandido el hábitat de algunos insectos y que ello ha dejado a ciertas poblaciones «expuestas a los virus». Dicho fenómeno no solo atañe a los virus, sino también a algunos parásitos, como el del paludismo.

Este error ha sido corregido en la versión digital del artículo.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



LA NAVE ESPACIAL *OSIRIS-REX*, de la NASA, intentará tomar muestras del asteroide Bennu y regresar con ellas a la Tierra para su posterior análisis (*recreación artística*).

CENTRO GODDARD DE VUELOS ESPACIALES DE LA NASA

SISTEMA SOLAR

Llegada a dos asteroides

Una misión japonesa y otra estadounidense comenzarán muy pronto a buscar pistas sobre el origen de la vida

Este verano, dos naves espaciales empezarán a estudiar muy de cerca sendos asteroides. Su objetivo: obtener materiales orgánicos que pudieran remontarse al nacimiento del sistema solar. Esos componentes básicos podrían resultar clave para entender el origen de los planetas y el de la vida en la Tierra, y, al mismo tiempo, podrían ayudar a hacerse ricos a aquellos que en un futuro decidan dedicarse a la minería espacial.

El pasado 27 de junio, la sonda japonesa *Hayabusa2* llegó a Ryugu, un asteroide de cerca de un kilómetro de diámetro. Y, si todo sale según lo previsto, el 17 de agosto la nave *OSIRIS-REx*, de la NASA, arribará a las inmediaciones de Bennu, de unos 500 metros de ancho. Durante los próximos dos años, estas rocas espaciales serán objeto de un intenso estudio, así como de varios intentos para recoger muestras que puedan traerse hasta la Tierra y ser sometidas a análisis [*véase* «Siete años de misión para reunir 60 gramos de asteroide», por Dante S. Lauretta; Investigación y Ciencia, septiembre de 2016].

«Numerosos grupos de todo el mundo podrán investigar esas muestras durante las próximas décadas», afirma Nancy Chabot, planetóloga de la Universidad Johns Hopkins que no participa en ninguna de las misiones. Los nuevos datos, asegura, «revolucionarán lo que sabemos sobre la composición y la formación de estos cuerpos procedentes de los primeros tiempos del sistema solar».

Hayabusa2 y *OSIRIS-REx* no serán las primeras naves que tomarán muestras de un asteroide. Ese honor se lo llevó la primera de las sondas *Hayabusa*, que en 2010 regresó a la Tierra con una pequeñísima porción del asteroide Itokawa tras un choque no planeado contra su

superficie. Itokawa pertenecía a los llamados asteroides de tipo S, compuestos en su mayor parte por materiales rocosos. Ryugu y Bennu, sin embargo, constituyen ejemplos de asteroides carbonáceos (ricos en carbono), o de tipo C: las rocas espaciales más comunes del sistema solar.

En conjunto, las muestras obtenidas por ambas misiones permitirán comprobar si estos asteroides poseen una composición similar a la de las condritas carbonáceas, un tipo de meteoritos hallados en la Tierra y que se caracterizan por contener sustancias orgánicas y agua en forma de minerales hidratados. La incógnita persiste porque la propia Tierra podría haberlos contaminado. Sin embargo, si la composición de los asteroides coincide con la de las condritas carbonáceas, ello indicaría que tales sustancias pudieron haber llegado a la Tierra directamente desde el espacio [*véase* «Meteoritos primitivos», por Alan E. Rubin, Investigación y Ciencia, abril de 2013; *y* «El origen del agua en la Tierra», por David Jewitt y Edward D. Young, Investigación y Ciencia, mayo de 2015].

Harold Connolly, encargado de muestras de la misión OSIRIS-REx, y Shogo Tachibana, de Hayabusa2, señalan que los meteoritos carbonáceos podrían haber sido la fuente de una parte del agua de la Tierra y de los compuestos necesarios para la vida. Dicha hipótesis podría verse reforzada con las primeras muestras prístinas de asteroides carbonáceos.

Chabot añade que, aunque lanzar dos misiones tan similares pueda parecer redundante, el resultado podría ser muy revelador. «Si las muestras [de ambos asteroides] son idénticas, eso nos estaría diciendo algo muy fundamental sobre lo homogéneos que eran los materiales del sistema solar», prosigue la investigadora. «Con todo, apuesto a que veremos algunas diferencias sorprendentes.»

Ambas misiones exhiben asimismo diferencias operacionales. La japonesa intentará que aterricen en Ryugu hasta tres vehículos robóticos y un módulo MASCOT de construcción europea, con miras a explorar la superficie del asteroide. También prevé disparar un proyectil de cobre de dos kilogramos, a fin de generar un cráter que revele su composición interna.

La primera de las sondas *Hayabusa* regresó a Tierra con menos de un miligramo de polvo de asteroide tras un histórico y accidentado viaje. Las nuevas misiones aspiran a reunir una cantidad mucho mayor de roca espacial prístina, por lo que a los investigadores les resultará más sencillo compartir y analizar las muestras. *Hayabusa2* pretende recoger tres muestras en diferentes localizaciones de Ryugu, hasta llegar a los 100 miligramos en total. *OSIRIS-REx*, por su parte, intentará obtener una cantidad mucho mayor en un único punto de la superficie de Bennu. Los científicos de ambas misiones piensan intercambiar muestras y cooperar durante todo el proceso. De hecho, Connolly trabaja tanto para la misión estadounidense como para la japonesa.

Por último, ambas naves podrían obtener valiosa información para la futura minería de asteroides, añade Chabot, que también ejerce como asesora científica de Planetary Resources, una compañía estadounidense que aspira a trabajar en el sector. Se trata de una de las empresas que, con el tiempo, esperan extraer minerales de estas rocas espaciales y también agua, la cual podrían convertir en combustible para propulsar futuras misiones hacia los confines del sistema solar.

No está previsto que *Hayabusa2* y *OSIRIS-REx* regresen a la Tierra hasta 2020 y 2023, respectivamente, pero la espera merecerá la pena. Y es que las muestras espaciales pueden gozar de una larga vida científica: hoy, numerosos laboratorios siguen investigando las muestras lunares obtenidas hace décadas por las misiones Apolo, ya que las constantes mejoras de las técnicas de análisis permiten volver a examinar con provecho especímenes antiguos.

—Jeremy Hsu

ASTROBIOLOGÍA

Astrogusanos

Una diminuta especie de nematodo es capaz de soportar enormes aceleraciones

Caenorhabditis elegans sería un fantástico piloto de combate. Este gusano redondo y de un milímetro de largo, muy usado en estudios biológicos, presenta una notable capacidad para soportar la aceleración. Los pilotos humanos pierden el conocimiento cuando alcanzan los 4 o 5 *g* (1 *g* denota la aceleración de la gravedad en la superficie terrestre). Sin embargo, una investigación reciente ha demostrado que *C. elegans* sale indemne de hasta 400.000 *g*. Dicho valor constituye una referencia importante, ya que se cree que las rocas que son expulsadas al espacio desde las superficies planetarias por erupciones volcánicas o impactos de asteroides podrían experimentar aceleraciones similares. En teoría, cualquier criatura que viajara como polizón y sobreviviese podría sembrar la vida en otro planeta, una idea conocida como «panspermia balística».



Tiago Pereira y Tiago de Souza, de la Universidad de São Paulo, introdujeron cientos de estos nematodos en una ultracentrifugadora y los sacaron una hora después, convencidos de que habrían muerto. Pero, para su sorpresa, «estaban nadando libremente, como si nada hubiera pasado», comenta Pereira. Más del 96 por ciento sobrevivió y los que lo hicieron no mostraron ningún cambio adverso desde el punto de vista físico ni conductual. «La vida puede soportar mucha más tensión de lo que pensamos», añade Pereira. Los resultados se publicaron en línea el pasado mes de mayo en la revista *Astrobiology*.

Los investigadores admiten que el experimento no reproduce por completo las características de un viaje interplanetario. En primer lugar, la ultracentrifugadora tardó unos cinco minutos en generar tales aceleraciones, mientras que las rocas expulsadas de un planeta las alcanzarían en una milésima de segundo. Además, el ensayo tampoco remedaba las duras condiciones del espacio exterior. «Habría que incluir otros factores, como la temperatura, el vacío y la radiación cósmica», apunta Cihan Erkut, bioquímico del Laboratorio Europeo de Biología Molecular, en Heidelberg, que no participó en la investigación. Con todo, Pereira asegura que su trabajo constituye un punto de partida para otros experimentos que busquen entender los límites de la vida.

—Katherine Kornei

STEVE GSCHMEISSNER, SCIENCE SOURCE

BIOLOGÍA

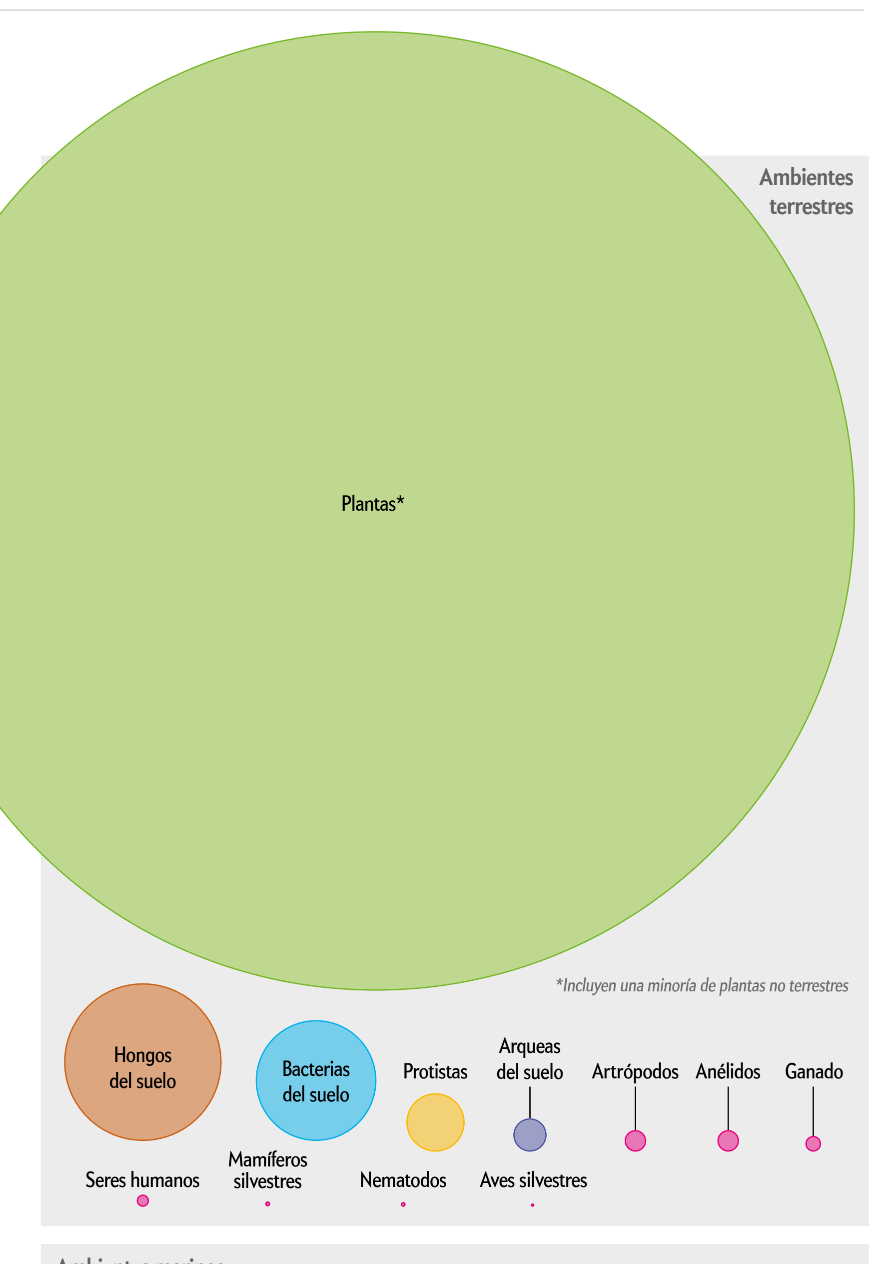
El inventario de la vida

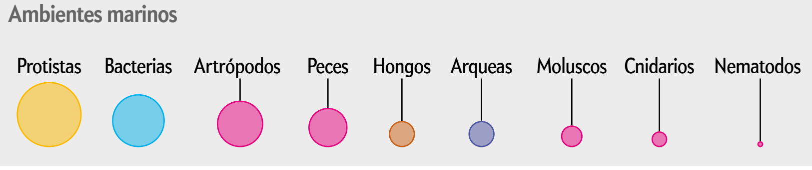
Un nuevo censo divide la biomasa terrestre según los organismos

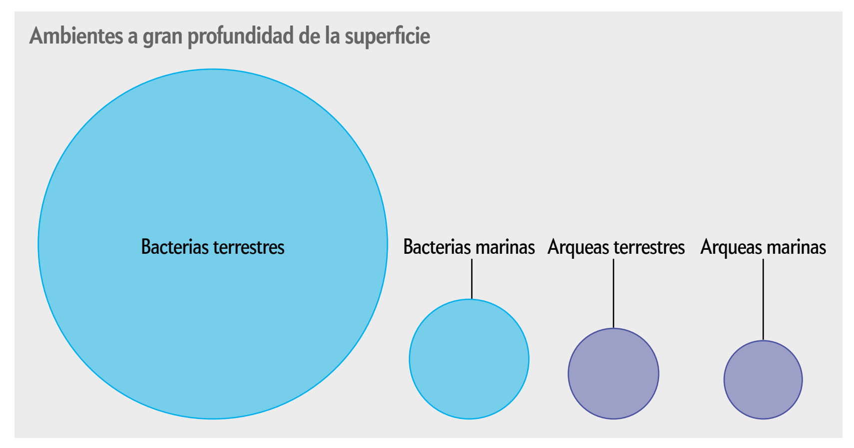
Las plantas rigen el planeta, al menos en términos de masa. Muchos recuentos de la vida en la Tierra utilizan la biodiversidad para medirla y simplemente cuentan el número de especies. Un nuevo censo, basado en la biomasa, ha recopilado datos de centenares de estudios para determinar qué reinos, clases y especies comportan el mayor peso global. Los resultados indican que las plantas (principalmente las terrestres) representan el 80 por ciento de la biomasa total; las bacterias de todos los ecosistemas, con el 15 por ciento, ocupan un distante segundo lugar. Los hallazgos se publicaron el pasado mayo en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*.

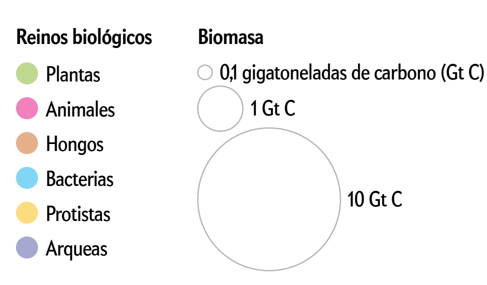
Los datos de alta resolución por satélite y las mejoras en la secuenciación genómica han permitido unas mediciones más precisas, pero la incertidumbre sigue siendo alta en el caso de organismos difíciles de contar, como los microbios y los insectos. El kril antártico, un conjunto de pequeños crustáceos, tiene una biomasa total similar a la de los humanos. Estos últimos constituyen solo un 0,01 por ciento de la biomasa total, pero aún superan a todos los mamíferos silvestres. El ganado también domina: por ejemplo, la biomasa de los pollos es tres veces superior a la de las aves silvestres. Según el estudio, las actividades humanas como la caza y la desforestación han reducido la biomasa de los mamíferos silvestres a una sexta parte y la biomasa de las plantas a la mitad.

—*Andrea Thompson*









Cada círculo representa un reino biológico o un subgrupo de un reino determinado. El área de cada círculo indica la cantidad de gigatoneladas de carbono contenido en el tejido vivo de todos los organismos del grupo mencionado.

FUENTE: «THE BIOMASS DISTRIBUTION ON EARTH», POR YINON M. BAR-ON ET AL. EN *PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES USA*, 21 DE MAYO 2018; AMANDA MONTAÑEZ *(gráfico)*

COMPORTAMIENTO

¿Los amigos de mis amigos son como yo?

Un experto explica un nuevo método para inferir rasgos de una persona a partir de sus redes sociales

Todos solemos pasar tiempo con gente que es como nosotros. Por ello, a los científicos de datos no les resulta difícil inferir los rasgos de personalidad de un individuo a partir de un análisis de sus redes sociales, tanto en línea como en el mundo real. Esa tendencia a buscar personas parecidas a nosotros recibe el nombre de «homofilia», una propensión que queda patente en el dicho «Dios los cría y ellos se juntan», señala Johan Ugander, investigador de Stanford que ha estudiado el fenómeno.

En un giro sorprendente, Ugander y su estudiante de posgrado Kristen M. Altenburger han descubierto que algunas personas se sienten atraídas de manera sistemática por aquellas que poseen ciertos atributos, con independencia de si estos coinciden o no con los suyos; un fenómeno que los investigadores han bautizado como «monofilia». Hasta ahora, se suponía que las heterogeneidades dificultaban extraer conclusiones sobre una persona a partir de sus redes de amigos. Sin embargo, el trabajo de Ugander y Altenburger demuestra que la monofilia tiene un interesante efecto: los amigos de los amigos de una persona son similares a ella en aspectos en que sus amistades inmediatas pueden no serlo. Ello podría facilitar inferir rasgos que de otro modo permanecerían ocultos, pero también aporta un método más para trazar información personal con minería de datos.

En un trabajo publicado en marzo en *Nature Human Behavior*, Ugander y Altenburger analizaron tres tipos diferentes de redes: una red social en línea, otra de blogs de política, y una muy estudiada de comunicación entre terroristas. Lo que sigue es un extracto de una entrevista en la que Ugander explica su investigación y sus implicaciones para la privacidad.

—*Andrea Anderson*

¿Fue la idea de que «los polos opuestos se atraen» lo que les llevó a estudiar la monofilia?

Lo que nos trajo a este proyecto fue el hecho básico y desconcertante de que en las redes sociales en línea apenas hay homofilia de género; es decir, un agrupamiento sistemático entre personas del mismo género. Sin embargo, sí que existe un agrupamiento muy importante por edades. El hecho de que casi no haya homofilia de género tiene consecuencias para la difusión de la información y la privacidad de los datos. Con todo, sigue siendo posible predecir el género de una persona en función del de los amigos de sus amigos. Este antiintuitivo punto de partida es lo que tratamos de presentar y explicar en la mayor parte del estudio.

¿Tener amigos de Facebook con diferentes opiniones políticas constituye un ejemplo de monofilia?

Con respecto a las ideas políticas, tendemos a rodearnos de personas con puntos de vista similares al nuestro. Dicho esto, sí que hemos observado una cantidad estadísticamente significativa de diferencias entre amigos al estudiar la orientación política en redes de blogueros. Hay algunas personas que hacen de puente: publican blogs progresistas pero tienden a enlazar a blogs conservadores, o viceversa.

¿Ha apreciado cambios en la forma en que se estudian las redes sociales debido a las preocupaciones sobre la privacidad?

Me veo como alguien que intenta hacer sonar las alarmas estudiando todas las posibles maneras de predecir cosas sobre las personas. Hace poco ha tenido lugar una sana discusión pública sobre la importancia de proteger la información contenida en las conexiones de las redes en línea. [Ugander estuvo vinculado a Facebook Data Science entre 2010 y 2014.] Por otro lado, comprender mejor a las personas a partir de su posición en una red social tiene también beneficios. Muchas investigaciones en ciencias sociales se centran en

---

CONSERVACIÓN

El latido acelerado de las orugas

Las mariposas monarca sufren estrés en su hábitat de los bordes de carretera

Cada año, en EE.UU. y el sur de Canadá, millones de mariposas monarca en época de apareamiento van en busca de asclepias (o algodoncillos) en las que depositar sus huevos. La preocupación que causa la reducción de su hábitat ha hecho que los conservacionistas dispongan espacios acogedores para las monarcas en los bordes de carreteras, que constituyen una parte importante de las zonas donde viven y que, por lo general, son de propiedad pública. Pero, según un estudio reciente, el ruido del tráfico provoca estrés en las orugas monarca y las expulsa del lugar. Con el tiempo, se acostumbran al ruido, pero esto también podría ocasionarles problemas en el futuro.

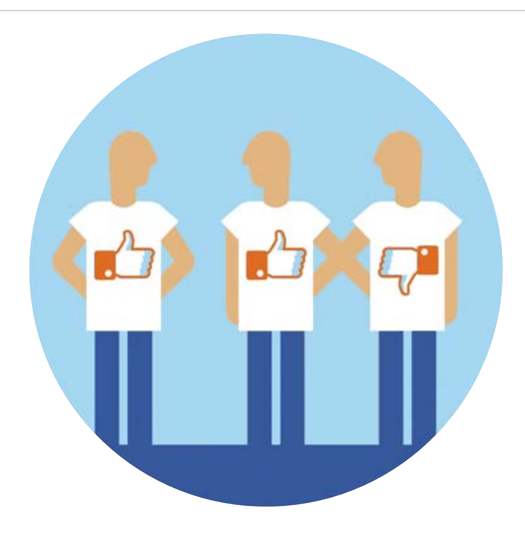


Se sabe que la contaminación acústica perturba la vida de las aves, las ballenas y otros animales. Pero hasta hace poco, no se había explorado si desencadena una respuesta de estrés en los insectos. Cuando Andy Davis, especialista en fisiología de la conservación de la Universidad de Georgia, observó por Internet vídeos de orugas monarca al borde de la carretera que parecían estremecerse cuando los coches pasaban zumbando, se preguntó cómo podría afectarles el ruido constante. Davis construyó un monitor cardíaco para las orugas, adaptando un pequeño sensor a un microscopio para medir con precisión la frecuencia cardíaca de las larvas monarca sometidas en el laboratorio al ruido registrado del tráfico.

El corazón de las orugas inmersas en el ruido durante dos horas latía un 17 por ciento más rápido que el de las situadas en una habitación silenciosa. Pero, en el número de mayo de *Biology Letters*, Davis y sus colaboradores comunicaron que la frecuencia cardíaca del grupo expuesto al ruido volvió a niveles basales tras oír sin parar el ruido del tráfico durante su período completo de desarrollo larvario de 12 días.

Según Davis, esta desensibilización podría resultar problemática cuando las orugas se transforman en individuos adultos. Una respuesta rápida al estrés es vital para las mariposas monarca durante su viaje de dos

JIM MCKINLEY, GETTY IMAGES



identificar relaciones causales auténticas y en descartar factores de confusión. Me interesa descubrir hasta qué punto es posible describir a las personas cuando tal vez no disponemos de datos demográficos, pero sí de esta valiosa red de relaciones sociales.

¿Le preocupa que su investigación pueda ser utilizada con fines perversos?

Sin duda. Cuando uno construye herramientas, tiene una responsabilidad sobre cómo se utilizan. El principal algoritmo que estudiamos se conoce desde 2009. Antes se pensaba que este método servía para predecir las actitudes o atributos de un individuo cuando en la red existían similitudes entre amigos. Sin embargo, estamos demostrando que la homofilia, o semejanza, no es necesaria para que este enfoque sea eficaz.

meses para pasar el invierno en México, mientras huyen de los depredadores y luchan contra el viento. «Lo que creo que sucede [en el borde de las carreteras] es que su reacción al estrés se satura cuando son larvas y [podría] estar alterada cuando viajan a México», comenta Davis.

No sabemos si un período de ruido durante la fase larvaria reduce la supervivencia de las monarcas, apunta Ryan Norris, ecólogo de la Universidad de Guelph, en Ontario, que no intervino en el estudio. Pero, en todo caso, Norris cree que los espacios en los bordes de carreteras se asocian casi seguro a una mayor mortalidad de las mariposas, debido a su colisión con los vehículos. «El hábitat de las carreteras tiene un gran potencial para las monarcas y otros insectos, y sería bueno aprovecharlo», comenta Norris, «pero apenas se puede eludir el tráfico».

Davis añade: «Pienso que las carreteras y las monarcas no son buenos aliados».

—Erica Tennenhouse

THOMAS FUCHS (*ilustración*); NANYANG TECHNOLOGICAL UNIVERSITY (*silla Ikea*)

INGENIERÍA

Yo, robot (de Ikea)

Una máquina logra montar una de las sillas de la conocida multinacional sueca

Cualquiera que haya pasado una tarde intentando armar un mueble de Ikea entenderá lo tentador que sería dejar que un robot se encargara de todo. No en vano, los kits de bricolaje de la compañía sueca se han convertido en una especie de banco de pruebas para los especialistas en robótica, quienes llevan años intentando fabricar autómatas lo bastante inteligentes y hábiles para insertar los tornillos y los tacos de madera en los agujeros correspondientes.

Ahora, un grupo de ingenieros de la Universidad Tecnológica de Nanyang, en Singapur, ha conseguido que un robot de dos brazos monte una silla STEFAN y encaje la mayoría de las piezas sin ayuda humana. Ayudada por sus brazos, pinzas de agarre, sensores y una cámara 3D, la máquina siguió los cerca de 50 pasos de las instrucciones y completó el armazón en 20 minutos. Además, el robot fue fabricado «con piezas estándar que ya se producen en serie, por lo que en un futuro muy próximo podría implantarse en fábricas», afirma QuangCuong Pham, profesor de ingeniería mecánica y aeroespacial que construyó el robot junto a Francisco Suárez-Ruiz y Xian Zhou. El equipo comunicó su logro el pasado mes de abril en la revista *Science Robotics*.

En lugar de usar técnicas de aprendizaje automático para entrenar al dispositivo y enseñarle a montar piezas, los ingenieros programaron el robot con un código tradicional. Así pues, en vez de basarse en el tipo de razonamiento más abstracto que permite la inteligencia artificial, se centraron en las facultades de percepción, planificación y control, explica Pham.

Aunque los movimientos de la máquina puedan parecer lentos y tediosos, esa capacidad para encajar tacos en agujeros aborda «un problema extremadamente complicado en robótica», enfatiza Ross Knepper, profesor de informática de Cornell que no participó en la investigación. En 2013, Knepper formó parte del equipo del Instituto de Tecnología de Massachusetts que construyó IkeaBot, un sistema autónomo de robots que montó con éxito las mesillas LACK de la empresa de muebles.

«Mientras que mi trabajo empleó la visión para resolver el problema de introducir un taco en un agujero, los investigadores de Nanyang lo han hecho mediante retroalimentación táctil: sintiendo si el taco entra o no», explica Knepper. «Las aplicaciones [de ambos enfoques] se dirigen a los muebles de Ikea, pero sus contribuciones a la robótica son muy distintas.»

La tecnología usada por el equipo de Nanyang permite reprogramar la máquina para diferentes tareas, entre las que posiblemente se encuentre el montaje de otros muebles. «El sueño sigue siendo tener un sistema robótico que pueda montar todo el catálogo de Ikea, pero aún no hemos llegado a ese punto», concluye Knepper.

—Larry Greenemeier



ROBOT de dos brazos montando una silla de la empresa de muebles Ikea.

NEUROCIENCIA

Tamaño corporal y número de neuronas

El perro bate a su rival en el hogar, el gato, en un nuevo intento de medir la potencia cognitiva

Un manto de células, surcado por profundos pliegues, envuelve el centro del cerebro en todos los animales vertebrados. Es la corteza cerebral, cuyas neuronas, que ascienden a unos 16.000 millones en los humanos, actúan como una suerte de minúsculos procesadores de información que crean los pensamientos.

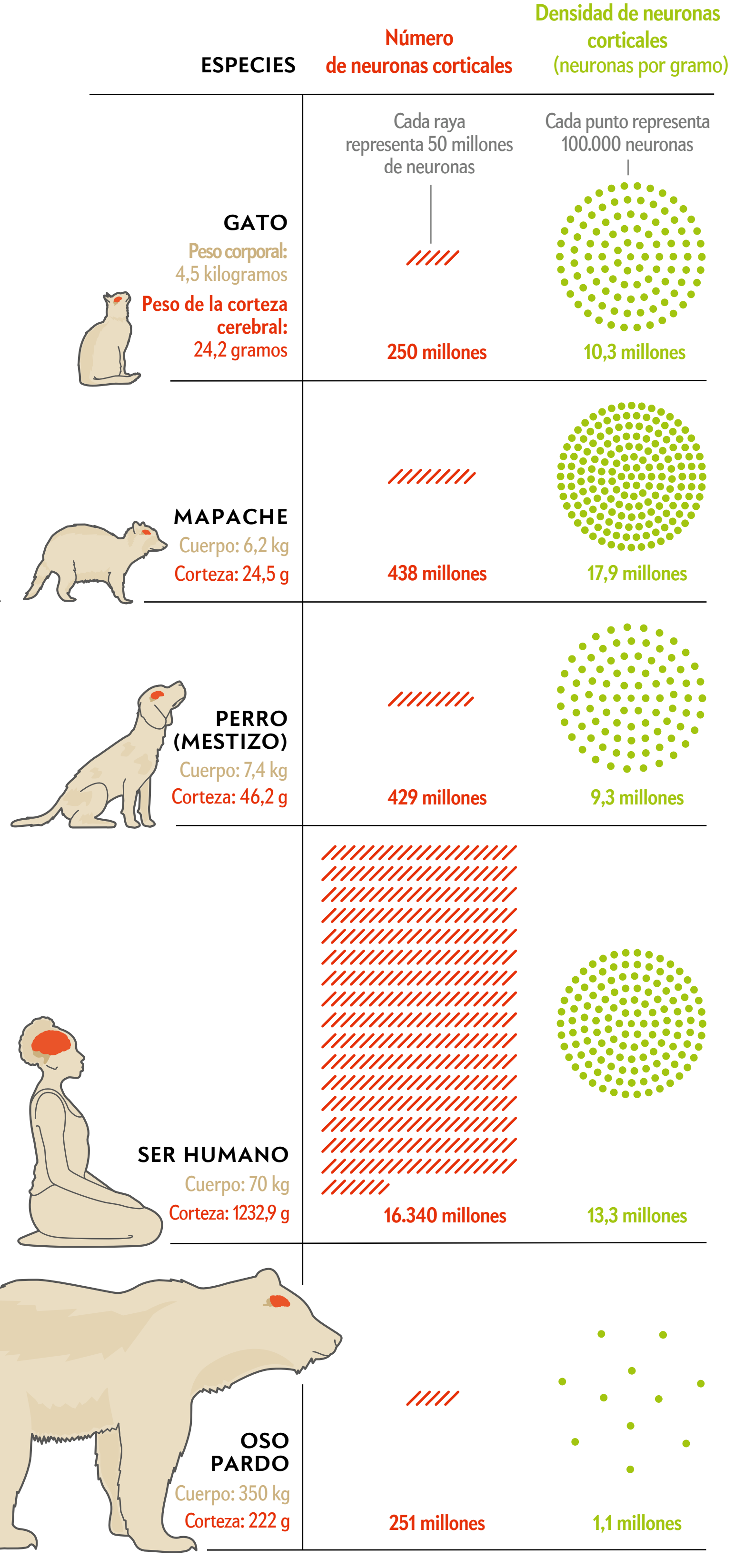
En nuestros animales domésticos, un nuevo recuento de esas neuronas revela que el perro supera holgadamente al gato. Un perro corriente posee casi 430 millones de neuronas corticales, en tanto que el gato apenas cuenta con 250 millones. «El perro tiene lo necesario para estar dotado de una mayor capacidad cognitiva», asegura Suzana Herculano-Houzel, neuroanatomista de la Universidad Vanderbilt, que publicó los resultados el pasado diciembre en *Frontiers in Neuroanatomy*. Sorprendentemente, la corteza más voluminosa de otros carnívoros no siempre alberga más neuronas.

A fin de identificar y contar tales células, Herculano-Houzel y sus colaboradores licuaron la corteza en una especie de batidora de laboratorio. El resultado recuerda el aspecto del zumo de manzana sin colar, explica la neuroanatomista. («Mis estudiantes me culpan porque ahora aborrecen el zumo de esa fruta.») A continuación, añadieron al caldo una sonda molecular que solo se une a los núcleos de las neuronas, no a otros tipos de células cerebrales.

Así averiguaron que el mapache, con una corteza similar a la del gato, dispone de casi el doble de neuronas. Y el oso ha resultado ser de poco seso: el número de neuronas es equiparable al del gato, en una corteza diez veces mayor. Esa parece ser la tónica en los grandes carnívoros, como el león. Ello tal vez se explique porque los animales de gran talla precisan mucha energía y las neuronas son insaciables en ese aspecto. Necesitan gran aporte de nutrientes, «por lo que tendrían el mínimo número necesario, dado su alto coste», afirma el antropólogo Evan Maclean, director del Centro de Cognición Canina de la Universidad de Arizona. Si un cuerpo musculoso ofrece al animal más posibilidades de supervivencia, no necesitará un cerebro especialmente dotado.

En cuanto al gato y el perro, matiza Maclean, el número de neuronas corticales no indica forzosamente que uno sea más inteligente que el otro, puesto que la cognición adopta múltiples formas y en ella intervienen otras regiones del cerebro. Agrega, eso sí, que hay indicios de que el perro retiene más tiempo la información, lo que podría estar vinculado con la capacidad cortical. Herculano-Houzel, a la sazón propietaria de dos perros y que ha recibido quejas de propietarios felinos por sus conclusiones, subraya: «Hay que quererlos igual, sin que importe el número de neuronas de su corteza».

—*Josh Fischman*



FUENTE: «DOGS HAVE THE MOST NEURONS, THOUGH NOT THE LARGEST BRAIN: TRADE-OFF BETWEEN BODY MASS AND NUMBER OF NEURONS IN THE CEREBRAL CORTEX OF LARGE CARNIVORAN SPECIES», POR DÉBORA JARDIM-MESSEDER ET AL. EN *FRONTIERS IN NEUROANATOMY*, VOL. 11, ARTÍCULO N.° 118. PUBLICADO EN LÍNEA EL 12 DE DICIEMBRE DE 2017; ILUSTRACIÓN DE LUCY READING-IKKANDA

ECOLOGÍA

Sedientos de sangre

Los mosquitos deshidratados pican con mayor frecuencia

Los mosquitos son los animales más mortíferos del mundo, ya que transmiten enfermedades que matan cada año a centenares de miles de personas. Solo pican las hembras, y lo hacen para obtener proteínas para sus huevos. Pero la sangre también sirve de bebida refrescante en un día caluroso y seco.

En un estudio reciente se ha descubierto que los mosquitos deshidratados son más agresivos, se posan más a menudo sobre los huéspedes y se alimentan con mayor frecuencia que los mosquitos que acceden fácilmente al agua. Y cuando aplacan su sed, también pueden aumentar la propagación de enfermedades, indica Joshua Benoit, biólogo de la Universidad de Cincinnati y autor principal del estudio publicado el pasado mayo en *Scientific Reports*.

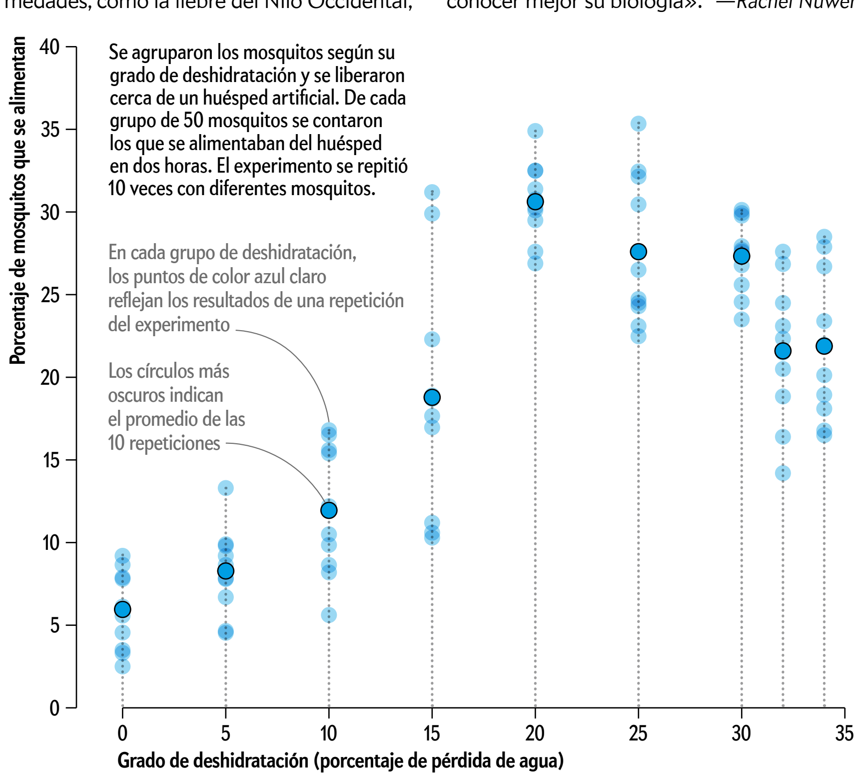
Como algunos mosquitos depositan los huevos en el agua, los investigadores daban por sentado que las condiciones de humedad elevada favorecían las enfermedades transmitidas por mosquitos. Sin embargo, estudios recientes dejan entrever lo contrario y relacionan la mayor transmisión de enfermedades, como la fiebre del Nilo Occidental, con las sequías. El descubrimiento de Benoit y sus colaboradores ayuda a explicar unos datos que contrastan con la mera intuición.

Su laboratorio se interesó en el impacto de la deshidratación sobre el comportamiento alimentario de los mosquitos, por casualidad: un trabajador se cayó en un depósito en el que había mosquitos privados de agua y notó que lo acosaban con mucho más vigor de lo habitual.

Los investigadores estudiaron tres especies de mosquitos que transmiten la fiebre amarilla, el zika y la fiebre del Nilo Occidental. Expusieron centenares de insectos a diferentes grados de temperatura y humedad en recipientes con o sin acceso al agua y al néctar (su fuente de azúcar preferida). Después examinaron la frecuencia con la que los insectos picaron a un «huésped»: una membrana caliente de plástico recubierta de sudor artificial, que contenía sangre de pollo.

En pocas horas, hasta un 30 por ciento de los mosquitos deshidratados se alimentaron de la sangre del huésped, en comparación con el 5 a 10 por ciento de los que disponían de agua. «Incluso los períodos cortos de deshidratación pueden tener grandes efectos», comenta Benoit.

Los hallazgos pueden ayudar a predecir la tasa de transmisión de enfermedades, opina Chloe Lahondere, entomóloga del Instituto Politécnico de Virginia, que no intervino en el estudio: «Para desarrollar nuevas estrategias contra estos insectos, es fundamental conocer mejor su biología». —*Rachel Nuwer*



FUENTE: «DEHYDRATION PROMPTS INCREASED ACTIVITY AND BLOOD FEEDING BY MOSQUITOES», POR RICHARD W. HAGAN ET AL. EN *SCIENTIFIC REPORTS*, VOL. 8, ART. 6804, 1 DE MAYO DE 2018; AMANDA MONTAÑEZ (*gráfico*); BIBLIOTECA NACIONAL DE ESPAÑA (*agenda*)

AGENDA

EXPOSICIONES

Hasta el 23 de agosto
Arbóreo: Los árboles nos cuentan su vida
Museo Nacional de Ciencias Naturales
Madrid
www.mncn.csic.es

Cosmos
Biblioteca Nacional de España
Madrid
www.bne.es



Maestros y discípulos en la Edad de Plata de la ciencia española
Biblioteca de la Facultad de Educación
Universidad Complutense
Madrid
biblioteca.ucm.es

Grandes hitos de las biociencias en España
Instituto Cervantes
Pekín
www.cultura.cervantes.es

OTROS

12 de agosto — Visita guiada
Observatorio Astronómico del Montsec
Instituto de Estudios Espaciales de Cataluña
Sierra del Montsec
Pirineo Central
http://www.oadm.cat/ca/visites.htm

Proyecciones
Los secretos de la gravedad
Para niños a partir de 8 años
Planetario - Museo de la Ciencia
Valladolid
www.museocienciavalladolid.es

Talleres
Misión códigos secretos: El arte de cifrar y descifrar mensajes
Para niños a partir de 7 años
Cosmocaixa
Barcelona
cosmocaixa.es

EVOLUCIÓN

Los orígenes evolutivos de la venganza

Un experimento con niños y chimpancés revela que los primates compartimos raíces comunes a la hora de castigar a nuestros enemigos y sentirnos bien por ello

NEREIDA BUENO GUERRA

Imagine que uno de sus seres más queridos fallece en un acto terrorista. Poco tiempo después, el responsable es capturado y condenado a muerte. Usted recibe una carta donde se le pregunta si desea presenciar la ejecución. ¿Asistiría?

Aceptar la invitación no es patológico. Junto con rasgos más conocidos de la naturaleza humana, como la empatía o el altruismo, las personas también tenemos la capacidad de sentir placer ante el dolor ajeno cuando ese dolor se considera merecido. Esta emoción recibe el nombre de *Schadenfreude*, palabra alemana que, pese a no tener equivalente directo en otros idiomas, no resulta demasiado difícil de comprender. Seguramente todos hayamos padecido alguna injusticia a lo largo de nuestra vida y nos hayamos alegrado al enterarnos de que, después, al responsable le ha ido mal. Se trata de algo parecido al altruismo recíproco, pero en su vertiente negativa: la venganza.

En un trabajo reciente cuyos resultados fueron publicados en *Nature Human Behaviour*, nuestro equipo de investigación ha explorado hasta qué punto esa emoción ya se encuentra presente en los niños pequeños y en nuestros parientes evolutivos vivos más cercanos, los chimpancés. Nuestros experimentos permiten concluir que la *Schadenfreude* es común a ambas especies, al tiempo que arrojan luz sobre su origen biológico, sentido evolutivo e impacto en nuestras sociedades.



DULCE VENGANZA: Nuestro cerebro parece estar neurológicamente preparado para que nos resulte satisfactorio ver padecer a quien previamente nos ha hecho daño. Un trabajo reciente ha explorado el origen evolutivo de este fenómeno.

Regodearse del enemigo

Mina Cikara, psicóloga de Harvard, y su equipo han llevado a cabo varios estudios destinados a entender ese sentimiento de alegría ante el percance de un enemigo. En 2013, su grupo pidió a aficionados de dos equipos de béisbol tradicionalmente enfrentados que observaran vídeos en los que el equipo contrario fallaba un tanto. Cuando eso ocurría, los participantes no solo sentían un placer subjetivo, tal y como referían en los cuestionarios, sino también uno objetivo: las neuroimágenes revelaron que en su cerebro se activaba el cuerpo ventral estriado, una región encargada de controlar la sensación de satisfacción. De hecho, se trataba de la misma respuesta que tenía lugar cuando su equipo marcaba un tanto.

Aquel hallazgo fue muy revelador. En estudios previos liderados por Tania Singer, investigadora del Instituto Max Planck de Cognición Humana y Ciencias del Cerebro, en Leipzig, se había observado que la activación de esa zona cerebral inhibía el impulso de ayudar a otra persona y, en su lugar, estimulaba el de castigarla. En otras palabras: el sentimiento de «dulce venganza» tiene un sustrato biológico. No solo nuestro cerebro parece neurológicamente preparado para que nos resulte satisfactorio ver padecer a quien previamente nos ha hecho daño, sino que los mismos procesos cerebrales también nos disponen a buscar el castigo del malhechor.

Este fenómeno tiene un sentido evolutivo: no resultaría muy rentable ayudar a quien nos ha causado un daño en el pasado, pues ello incrementaría las probabilidades de sufrir daños adicionales en el futuro. Por tanto, y aunque es cierto que somos cooperadores naturales, como ha demostrado Martin Nowak, biólogo de Harvard, cabe concluir que los humanos somos también vengadores naturales.

Aversión a la injusticia

Ahora bien, ¿somos los únicos seres vivos capaces de vengarse y de sentirnos bien por ello? Si la selección natural ha sido lo que nos ha llevado a establecer ciertas bases neurales asociadas a este comportamiento, cabría pensar que ello obedeció

a un proceso de resolución de conflictos al que los primates hicieron frente durante millones de años. En tal caso, no parece descabellado concluir que quizá compartamos dichas bases neurales con otras especies de primates.

Para estudiar si los primates no humanos son capaces de vengarse, lo primero que hemos de hacer es demostrar que interpretan como injustos los actos que les perjudican. En un estudio de 2003 liderado por Frans de Waal, primatólogo de la Universidad Emory, una experimentadora recompensaba de distinta forma (con pepino o uvas) a dos monos capuchinos por realizar el mismo trabajo. Si el mono que recibía la recompensa de menor valor (el pepino) se mostraba indiferente, ello implicaría que las situaciones que los humanos entendemos como injustas no lo son para otros simios, por lo que no cabría esperar que buscasen venganza. En cambio, si el mono perjudicado mostraba signos de enfado, se podría pensar que sí sentía aversión hacia la inequidad.

En efecto, los monos tratados de forma injusta rechazaron la comida y reaccionaron con gran enojo. Aquel hallazgo sentó las bases del estudio filogenético de la venganza, ya que demostró que, al igual que nosotros, los primates no humanos reaccionan ante situaciones injustas.

Identificar al culpable

No obstante, para llevar a cabo una venganza no basta con reaccionar ante la injusticia. Otro elemento imprescindible consiste en aplicar el castigo al responsable de nuestro daño. Si quien nos causa un perjuicio es Juan, pero como respuesta castigamos a Luis, no nos estaremos vengando, sino redirigiendo nuestra agresión. Esto es algo que hacemos cuando volvemos a casa enfadados del trabajo y respondemos mal a nuestros hijos. Nos comportamos así porque no hemos podido castigar al responsable de nuestro enfado, de modo que lo descargamos sobre otra persona más accesible.

Ahora bien, una venganza no tiene por qué ser directa. En lugar de recaer sobre el agresor, puede también dirigirse a alguien que sea muy importante para este último, como su familia o amigos. Una vez más, los primates no humanos han demostrado que pueden entender quién les ha hecho daño y dirigir su castigo de forma tanto directa como indirecta.

A finales de los años ochenta, De Waal y Lesleigh Luttrell, de la Universidad de Wisconsin-Madison, hallaron que los chimpancés castigaban a aquellos congéneres que les habían hecho daño; es decir, aplicaban venganzas directas. Más tarde, Filippo Aureli, de la Universidad Veracruzana, y su equipo analizaron las agresiones entre los miembros de un grupo de macacos japoneses. Anotaron los nombres de perpetradores y víctimas y continuaron observando su comportamiento durante una hora tras la agresión. Descubrieron que las víctimas solían llevar a cabo su venganza sobre los familiares del agresor; en particular, sobre aquellos más jóvenes y con menor posición social.

Ambos estudios arrojaron una idea clara: la venganza existe en la naturaleza y seguramente cumple la función de disuadir a nuestros enemigos de llevar a cabo un nuevo ataque. No obstante, aún quedaba por demostrar si, además de aplicar castigos motivados por la venganza (causados por un acto hostil previo), los primates no humanos podían también aplicar castigos gratuitos, motivados únicamente por el deseo de dañar al prójimo.

¿Venganza o malicia?

En 2007, investigadores liderados por Keith Jensen, del Instituto Max Planck de Antropología Evolutiva, en Leipzig, intentaron aclarar esta cuestión. Diseñaron varias situaciones en las que un chimpancé se convertía en víctima al perder una bandeja con comida. Unas veces el experimentador movía la bandeja hacia una sala vacía; otras la desplazaba hacia una sala en la que había otro chimpancé; y otras era un tercer chimpancé quien le robaba la bandeja.

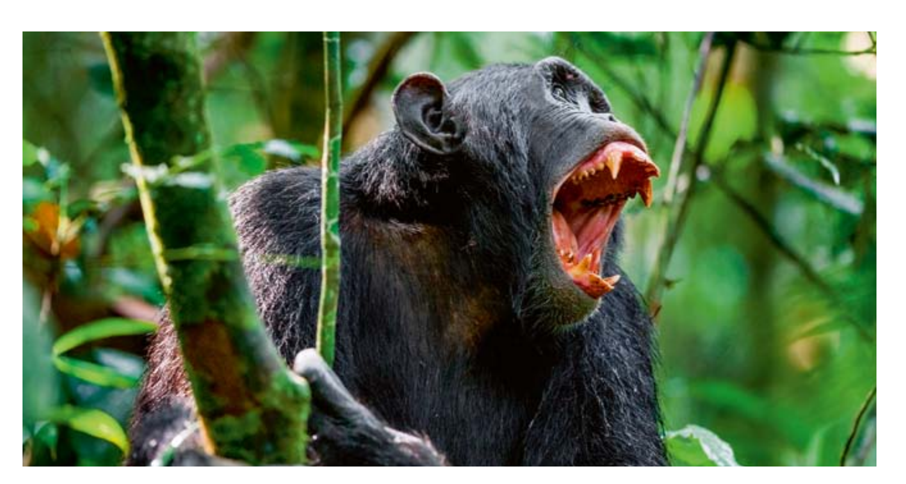
En todos los casos, el chimpancé víctima tenía a su disposición una cuerda. Si tiraba de ella, la bandeja caía al suelo y nadie podía aprovechar la comida. Así pues, tirar de la cuerda no proporcionaba ninguna recompensa material a la víctima, pero permitía explorar si esta tenía en cuenta o no la situación en la que había sufrido la pérdida. Si tiraba de la cuerda cuando era un compañero quien le había robado la bandeja, su motivación podía interpretarse como «vengativa» (con la intención de hacer daño al responsable). En cambio, si lo hacía cuando era el experimentador quien había movido la bandeja hacia el compañero, cabía interpretar su motivación como «maliciosa» (para hacer daño de forma indiscriminada). Por último, tirar de la cuerda cuando la comida se hallaba en una sala vacía podía interpretarse como frustración.

Los resultados mostraron que los chimpancés tiraban mucho más de la cuerda ante el robo por parte de un congénere. Es decir, presentaban una tendencia a castigar por venganza, pero no a hacerlo de forma indiscriminada.

***Schadenfreude* en niños y primates**

Una vez establecida la existencia de la venganza en primates no humanos, ¿qué cabe decir sobre el sentimiento de *Schadenfreude*, el placer que sentimos al presenciar un castigo que consideramos merecido?

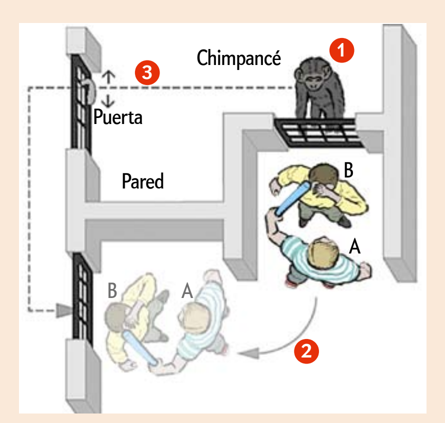
Para abordar esta pregunta, nuestro equipo llevó a cabo un experimento con niños y chimpancés. Diseñamos varias situaciones en las que niños de distintas edades (4, 5 y 6 años) y chimpancés entraban en contacto con un agente amable, *A*,

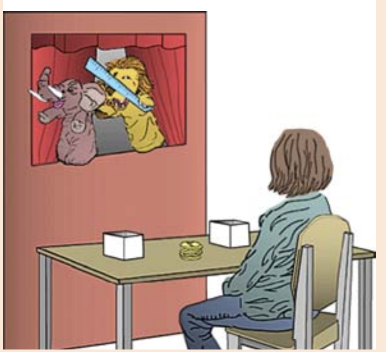


PARIENTES VENGATIVOS: A lo largo de los últimos años, varios estudios han demostrado que, al igual que nosotros, los primates no humanos muestran aversión hacia las injusticias, buscan venganza ante las afrentas y prefieren castigar al culpable antes que dañar a un inocente.

PAGAR PARA PRESENCIAR UN CASTIGO

UN EXPERIMENTO ha demostrado que tanto los chimpancés (*izquierda*) como los niños de seis años (*derecha*) buscan activamente presenciar el castigo de un congénere que previamente se ha portado mal con ellos. Junto con otros estudios, estos resultados sugieren que el sentimiento de «sed de venganza» emergió a lo largo de la evolución como parte de un mecanismo destinado a desincentivar agresiones futuras.





Chimpancés e investigadores: (1) Un chimpancé observa cómo un experimentador (*A*) golpea a otro (*B*) que previamente había dado comida al animal o se la había quitado. (2) Los investigadores se apartan hasta quedar fuera de la vista del primate. (3) Si quien estaba recibiendo el castigo era el experimentador que había privado de comida al chimpancé, el primate se mostraba dispuesto a abrir una puerta muy pesada para cambiar de lugar y poder seguir presenciando el castigo.

Niños y marionetas: Situación análoga con niños y marionetas. Tras observar el castigo de una marioneta por parte de otra, se baja el telón, lo que impide que el niño pueda seguir viendo la escena. Si la marioneta castigada se había comportado previamente mal con el pequeño (quitándole los juguetes), este aceptaba pagar una moneda para levantar el telón y poder continuar observando los golpes.

y otro desagradable, *D*. Para los niños, *A* era una marioneta que les entregaba juguetes y *D* otra que se los quitaba; para los chimpancés, *A* era un investigador que les daba comida y *D* otro que se la retiraba. Después, un tercer agente (marioneta o experimentador) entraba en escena y golpeaba a *A* y a *D* por separado.

En cierto momento, tanto los niños como los chimpancés dejaban de ver los golpes. En el caso de los pequeños, se bajaba un telón que les impedía ver las marionetas; en el de los chimpancés, los investigadores se retiraban a un lugar donde el animal no podía verlos. Si deseaban seguir observando la escena, ambos tenían que afrontar un coste: los niños debían pagar unas monedas para que se subiese el telón, mientras que los chimpancés tenían que abrir una puerta muy pesada que daba acceso a la esquina donde transcurría la acción.

Nuestra hipótesis era que, si los niños o los chimpancés sentían *Schadenfreude*, asumirían esos costes solo cuando se castigaba al agente desagradable. En cambio, si el placer de presenciar los golpes era más bien indiscriminado, pagarían por ver el castigo tanto del agente antisocial como del amigable. Para analizar mejor las reacciones, registramos también las expresiones faciales de los niños y las vocalizaciones de los chimpancés.

Los niños de 4 y 5 años pagaban para ver el castigo de ambos agentes. No obstante, eso cambiaba en los pequeños de 6 años, quienes preferían claramente presenciar el castigo del agente desagradable, lo que además acompañaban con más sonrisas. Por su parte, los chimpancés estaban más dispuestos a asumir costes cuando se castigaba al agente antisocial, mientras que emitían vocalizaciones similares al llanto cuando observaban al agente amable recibir el primer golpe, algo compatible con la empatía.

Después nos preguntamos si los chimpancés también estarían dispuestos a hacer un esfuerzo por presenciar el castigo de un agente que hubiese sido desagradable hacia otro compañero. ¿Sienten estos simios una inclinación hacia la «justicia universal», o tan solo están interesados en vengar las afrentas propias?

Al hacer que los chimpancés presenciasen la acción de los agentes *A* y *D* sobre un congénere, comprobamos que no mostraban interés por abrir la puerta en una situación más que en la otra. Ello indica que estos simios parecen vivir el castigo de forma individual. Ese comportamiento contrasta con el de los humanos, quienes buscamos el castigo ante afrentas tanto personales como ajenas.

Biología y sistemas de justicia

Desde un punto de vista evolutivo, parece claro que la venganza no es exclusiva de los humanos. Los primates compartimos un camino común relacionado con el castigo: reaccionamos ante las injusticias; nos vengamos directa o indirectamente; preferimos la venganza justificada antes que el daño gratuito, y experimentamos *Schadenfreude* cuando presenciamos un castigo que consideramos merecido.

Si bien estos datos revelan un lado oscuro en nuestra naturaleza, son también la base de nuestros sistemas de protección social. Gracias a que los humanos extendemos a situaciones ajenas esa satisfacción ante el castigo merecido, hemos configurado sistemas legales que protegen a nuestra especie como colectivo, como el derecho penal o la Declaración Universal de los Derechos Humanos. Tal vez el siguiente paso evolutivo consista en ampliar esa satisfacción ante el castigo a la protección de todas las especies.

Nereida Bueno Guerra *investiga en el Departamento de Psicología de la Universidad Pontificia de Comillas.*

PARA SABER MÁS

Monkeys reject unequal pay. Sarah F. Brosnan y Frans B. M. de Waal en *Nature*, vol. 425, págs. 297-299, septiembre de 2003.

Chimpanzees are vengeful but not spiteful. Keith Jensen, Josep Call y Michael Tomasello en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 104, n.º 32, págs. 13.046-13050, agosto de 2007.

Preschool children and chimpanzees incur costs to watch punishment of antisocial others. Natacha Mendes et al. en *Nature Human Behaviour*, vol. 2, págs. 45-51, enero de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Así negocian los animales. Frans B. M. de Waal en *IyC*, junio de 2005.

¿Por qué cooperamos? Martin A. Nowak en *IyC*, octubre de 2012.

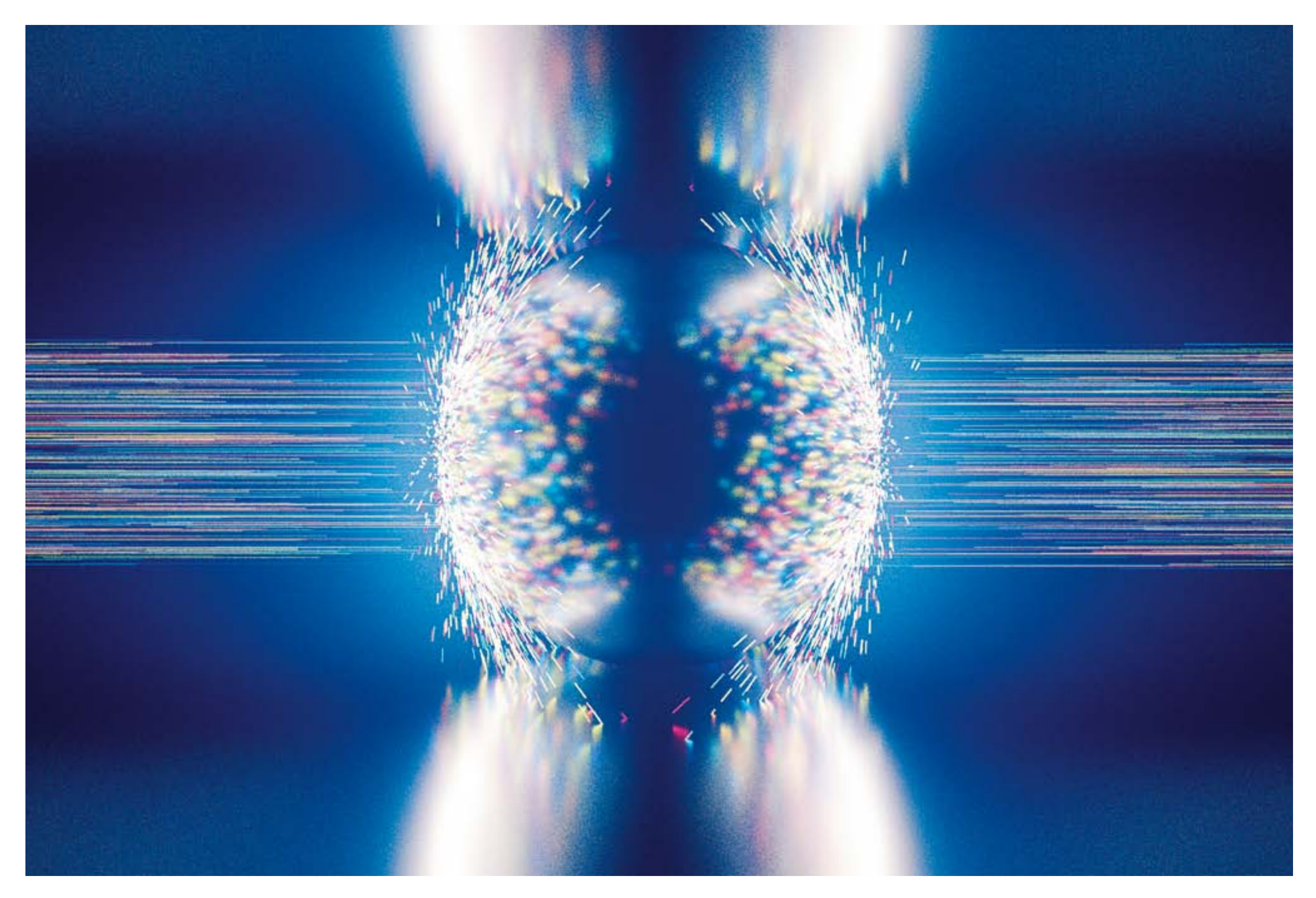
Sed de venganza. Eva Eismann en *MyC* n.º 63, 2013.

FÍSICA DE PARTÍCULAS

La carga débil del protón

Un nuevo trabajo logra determinar con enorme precisión la intensidad con que el protón experimenta la interacción débil. El resultado pone a prueba el modelo estándar de la física de partículas.

XIAOCHAO ZHENG



TEST DE PRECISIÓN: Recreación artística del bombardeo de un protón (*centro*) con un haz de electrones (*líneas*) levógiros o dextrógiros. Gracias a este diseño experimental, un trabajo reciente ha logrado medir la carga del protón con respecto a la única interacción fundamental que viola la simetría de paridad.

Las partículas subatómicas interaccionan mediante cuatro fuerzas fundamentales. Solo dos de ellas tienen efectos a escalas macroscópicas: la gravedad, que nos mantiene pegados a la Tierra, y el electromagnetismo, que causa los rayos en los días de tormenta. Las dos restantes, las fuerzas nucleares débil y fuerte, no nos afectan de manera directa.

Sabemos también que la masa se encuentra en el origen de la interacción gravitatoria y que las cargas eléctricas y los momentos magnéticos son clave en el electromagnetismo. Sin embargo, las propiedades que determinan las intensidades de las interacciones débil y fuerte, conocidas respectivamente como carga débil y carga de color, nos resultan menos familiares.

En un artículo publicado hace poco en *Nature*, la colaboración Qweak, del Centro Nacional de Aceleradores Thomas Jefferson, en EE.UU., ha descrito la primera medida de precisión de la carga débil del protón. El resultado establece fuertes restricciones sobre qué tipo de física no puede describirse con las teorías actuales.

Electrones frente a un espejo

La interacción fuerte es tan intensa que las partículas que la experimentan (los quarks y los gluones) se ligan entre sí y solo existen en el interior de objetos compuestos, como los protones y los neutrones. Por su parte, la interacción débil es tan endeble que sus efectos quedan enmascarados casi por completo por los del electromagnetismo. Podemos entonces preguntarnos cómo es posible medir la carga débil, si es tan diminuta como su nombre implica. Por fortuna, la naturaleza nos brinda una herramienta para hacerlo: un principio físico llamado «simetría de paridad».

Decimos que un proceso conserva la simetría de paridad si tiene la misma probabilidad de ocurrir que el proceso que obtendríamos al reflejar su imagen en un

espejo. Resulta sencillo ver que esta simetría está rota en el mundo macroscópico; en particular, en los sistemas biológicos. Por ejemplo, la mayoría de los humanos son diestros. Si la simetría de paridad estuviese conservada para la lateralidad humana, la mitad de la población sería diestra y la otra mitad, zurda.

Las partículas también tienen cierta lateralidad, lo que en jerga técnica denominamos «quiralidad»: pueden ser dextrógiras o levógiras. Una partícula dextrógira «gira» en la dirección en que se cierran los dedos de la mano derecha cuando alineamos el pulgar con el sentido de su movimiento. Para una partícula levógira la regla es análoga, pero con la mano izquierda.

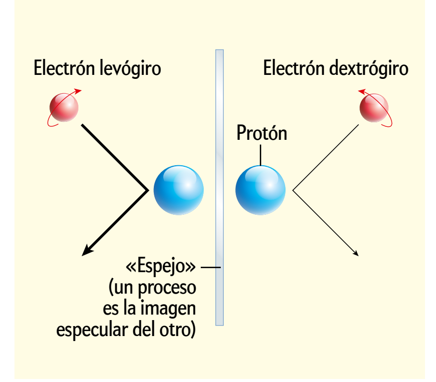
Lo sorprendente es que todas las partículas subatómicas violan la simetría de paridad cuando interaccionan entre sí mediante la interacción débil. Así pues, una forma de determinar la carga débil de una partícula consiste en comparar su comportamiento en las versiones levógira y dextrógira de un proceso.

En este caso, la colaboración Qweak hizo colisionar contra un protón un haz de electrones con una quiralidad dada. Después, los investigadores midieron la asimetría correspondiente a la diferencia en la probabilidad de que el protón interaccionase con un electrón dextrógiro y con uno levógiro. Dicha asimetría resultó ser de −226,5 ± 9,3 partes por mil millones, donde el signo menos indica que es más probable que un protón disperse un electrón levógiro que uno dextrógiro.

Para poner este número en perspectiva, pensemos en el monte Everest. Si la simetría de paridad se violase en la misma medida para su altura, la diferencia entre el Everest y su imagen especular sería de tan solo 2 milímetros. Además, esa diferencia tendría que determinarse con una precisión de 80 micrómetros.

El resultado goza de una precisión mucho mayor que la de cualquier experimento previo que haya estudiado la violación de paridad mediante la dispersión de electrones por núcleos. En 2005, el experimento E158, del Laboratorio Nacional de Aceleradores SLAC, en California, alcanzó una precisión equiparable, pero su objetivo era medir la carga débil del electrón, no la del protón.

De la asimetría obtenida por la colaboración Qweak se sigue que la carga débil del protón es 0,0719 ± 0,0045, en excelente acuerdo con el valor predicho por el modelo estándar de la física de partículas. Para hacernos una idea del significado físico de este número, cabe señalar que, en las convenciones usadas por los autores, la carga eléctrica del protón es +1.



ASIMETRÍAS Y CARGA DÉBIL: Según su sentido de giro (*flecha roja*) relativo a su dirección de movimiento (*flecha negra*), los electrones pueden ser dextrógiros o levógiros. Un nuevo trabajo ha encontrado que es ligeramente más probable que un protón disperse electrones levógiros que dextrógiros. El resultado viola un principio físico conocido como simetría de paridad y permite calcular la «carga débil» del protón, la cantidad que determina la intensidad con que esta partícula experimenta una de las cuatro interacciones fundamentales de la naturaleza.

Sondas de alta energía

Una pregunta natural es por qué los físicos desean medir la carga débil del protón con semejante minuciosidad. La respuesta breve sería que lo hacen para poner a prueba los límites de nuestro conocimiento. Lo que pretenden descubrir es si las teorías actuales fallan —y, si lo hacen, en qué medida— a la hora de describir los datos experimentales. Una divergencia entre teoría y experimento podría implicar la existencia de una quinta fuerza fundamental: un nuevo tipo de interacción hasta ahora desconocida que sería relevante a energías más elevadas que las exploradas hasta el momento.

Las medidas realizadas por la colaboración Qweak muestran que esta hipotética quinta fuerza, en caso de existir, solo se pondría de manifiesto cuando la energía de la partícula superase varios teraelectronvoltios (TeV). Como comparación, la energía liberada en los reactores nucleares de fisión es del orden de 10^{-6} TeV por partícula.

Ese valor mínimo para la escala de energías a la que podría aparecer nueva física resulta similar a la energía alcanzada en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN, el laboratorio europeo de física de partículas. La coincidencia resulta sorprendente, en tanto que la energía del haz de electrones usado por la colaboración Qweak era miles de veces menor que la de un haz de protones del LHC.

Hace más de un siglo, Robert Millikan demostró que la carga eléctrica aparece siempre en paquetes discretos. Aquello proporcionó una conexión entre el electromagnetismo clásico y la mecánica cuántica. En física de partículas, medir cantidades con una precisión cada vez mayor abre la puerta a descubrir nuevas interacciones y partículas, algo que, llegado el caso, nos obligaría a revisar las teorías actuales. Con todo, esta noble búsqueda solo puede mantenerse si las investigaciones son realzadas por múltiples grupos a lo largo de generaciones, no por equipos aislados. Cabe esperar que, algún día, el conocimiento obtenido de este modo conduzca a un gran avance. Mientras tanto, entender mejor las leyes físicas que rigen la naturaleza hará de nuestro mundo un lugar mejor.

Xiaochao Zheng *investiga en el Departamento de Física de la Universidad de Virginia en Charlottesville.*

Artículo original publicado en *Nature* vol. 557, págs. 171-172, 2018. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2018

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Precision measurement of the weak mixing angle in Møller scattering. SLAC E158 Collaboration en *Physical Review Letters*, vol. 95, art. 081601, agosto de 2005.

Precision measurement of the weak charge of the proton. Jefferson Lab Qweak Collaboration en *Nature*, vol. 557, págs. 207-211, mayo de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

El interior del protón. Robert Klanner en *IyC*, junio, 2001.

El problema del radio del protón. Jan C. Bernauer y Randolf Pohl en *IyC*, abril de 2014.

¿Indicios de nueva física en el LHC? Joaquim Matias en *IyC*, agosto de 2017.

EVOLUCIÓN

Cuando las diferencias sexuales llevan a la extinción

El aspecto de algunas especies varía notablemente entre los machos y las hembras. Ahora se ha visto que un fuerte dimorfismo sexual puede conllevar serias desventajas

HANNA KOKKO

Resulta tentador imaginar la evolución como un proceso que implica una mejora interminable. Los organismos que se reproducen sexualmente mezclan constantemente sus genomas, lo que les proporciona nuevos elementos que pueden serles de ayuda a la hora de lidiar con los desafíos a los que se enfrentan. Así que, ¿por qué se extinguen en algunas ocasiones? ¿Es solo mala suerte? ¿O es posible que la selección haya dado lugar a rasgos que hagan que una especie entre en una «zona de peligro», caracterizada por implicar un mayor riesgo de extinción? En un estudio publicado en abril en *Nature*, Maria João Fernandes Martins, del Museo Nacional de Historia Natural de los Estados Unidos, y sus colaboradores informan de su análisis del registro fósil e identifican una de esas zonas de peligro. Cuando los machos y las hembras de una especie tienen un aspecto notablemente diferente, aparecen durante menos tiempo en el registro fósil que aquellas especies en las que los machos y las hembras se asemejan.



LA DANZA DE CORTEJO DE UN ARÁCNIDO: Ciertas especies muestran diferencias morfológicas entre sexos muy marcadas. Los machos de las arañas pavo real (*Maratus*), poseen un colorido mucho más llamativo que las hembras. Ahora se ha investigado si esas diferencias morfológicas en una especie de ostrácodo fósil afectaron a su riesgo de extinción.

Pequeños crustáceos reveladores

Martins y su equipo han estudiado ostrácodos fosilizados, un grupo de crustáceos diminutos que recuerdan a una mezcla entre una gamba y un mejillón, aunque, evolutivamente, se hallan más cerca de la primera. Los ostrácodos aparecen en mayor grado en el registro fósil que sus primos distantes más famosos, los trilobites, lo que constituye una ventaja cuando se quiere estimar el riesgo de extinción.

Además, hoy en día existen miles de especies de ostrácodos. Por lo tanto, se sabe que la forma de su exoesqueleto (la parte que se fosiliza del animal) puede utilizarse para distinguir los machos de las hembras. Ellos son más alargados que ellas porque necesitan un espacio extra para sus órganos reproductores. Sin embargo, mientras que en algunas especies el tamaño corporal total de los machos supera al de las hembras, en otras ellas son más grandes. Las diferencias de tamaño y forma entre sexos pueden ser pequeñas o muy pronunciadas, dependiendo de la especie en cuestión.

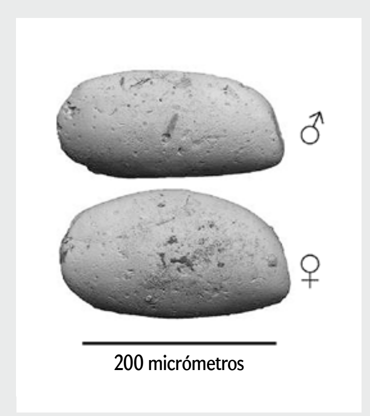
Los autores han analizado la forma y el tamaño de fósiles de exoesqueletos de 93 especies de ostrácodos. Estas vivieron en lo que ahora es el este de Misisipi, hace entre 84 millones y 66 millones de años, durante el período Cretácico superior, en una época en la que un mar interior dividía Norteamérica en dos mitades, una oriental y otra occidental. El análisis de los fósiles efectuado por los autores, además de un enfoque basado en modelos estadísticos, ha puesto de manifiesto un curioso patrón. Al comparar las especies, han visto que aquellas en las que los machos eran muy diferentes de las hembras tenían menos posibilidades de continuar existiendo. Los modelos de los autores predicen un riesgo de extinción por unidad de tiempo diez veces superior para aquellas especies en las que los machos son más grandes que las hembras y hay mayores diferencias morfólogicas entre ambos, que en aquellas especies en las que los machos son más pequeños que

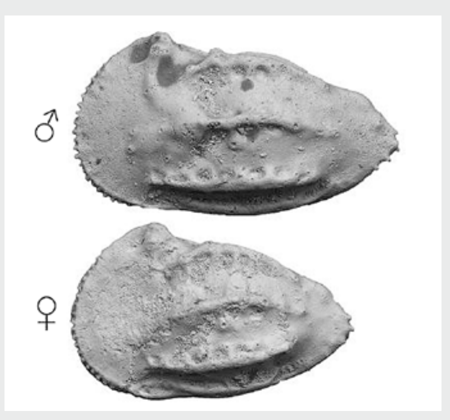
las hembras y ambos se asemejan más en la forma.

Este importante hallazgo para nuestra comprensión de la evolución resulta interesante no solo para los entusiastas de los ostrácodos. La reproducción sexual abre la puerta a la selección sexual, esto es, la selección de las características que fomentan que el apareamiento sea exitoso. Por lo tanto, la generación de una descendencia requiere no solo contar con aptitudes que faciliten la supervivencia, sino también presentar rasgos que doten de mayores oportunidades para reproducirse. Ello puede dar lugar a la aparición de diferentes presiones de selección para machos y hembras. Además, existe un creciente reconocimiento en la biología evolutiva de que las desemejanzas sexuales tienen el potencial tanto para ayudar como para dificultar la persistencia de poblaciones enteras o de especies.

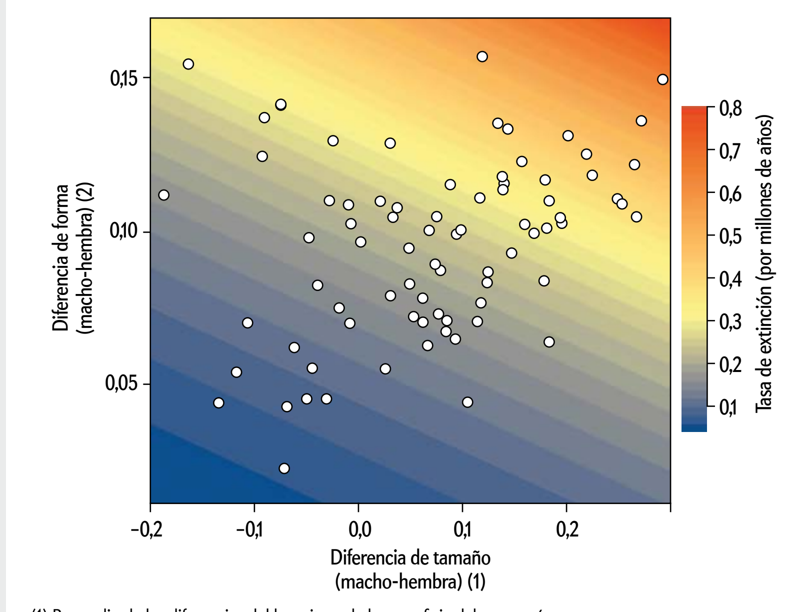
DIFERENCIAS PERJUDICIALES

EN LOS OSTRÁCODOS, unos diminutos crustáceos, la forma y el tamaño varían en distintos grados entre machos y hembras. La magnitud de estas diferencias sexuales se ha relacionado con su riesgo de desaparición en el registro fósil.





Dos ejemplos de dimorfismo sexual: en la especie fósil *Krithee cushmani* (*izquierda*), los machos (♂) son ligeramente más alargados (mayor cociente entre longitud y anchura) y pequeños que las hembras (♀), mientras que en *Veenia ponderosa* (*derecha*), ellos son mucho más alargados y grandes que ellas.



(1) Promedio de las diferencias del logaritmo de la superficie del caparazón
(2) Promedio de las diferencias del logaritmo del cociente entre longitud y anchura

Tras estudiar el grado de las diferencias sexuales en 93 especies de ostrácodos (*puntos*), se ha observado que en aquellas en las que los machos son mucho más grandes y alargados que las hembras, el riesgo de extinción es superior (*naranja* y *rojo*) que cuando ellas son más grandes y alargadas que ellos (*azul oscuro*).

FUENTE: «HIGH MALE SEXUAL INVESTMENT AS A DRIVER OF EXTINCTION IN FOSSIL OSTRACODS» POR M. J. F. MARTINS ET AL. EN *NATURE*, VOL. 556, PÁGS. 366-369, 2018.

Pros y contras de las diferencias sexuales

Si los machos invierten fuertemente en características que los ayudan en tareas diferentes a las llevadas a cabo por las hembras, la población se puede beneficiar si existe una selección fuerte que elimine a los machos cuyas actuaciones son deficientes y que conduzca a que el genoma de la especie esté mejor adaptado con el paso del tiempo. Sin embargo, también existe un peligro. La selección para el éxito reproductivo de los machos puede dar como resultado características que son dañinas para las hembras, cuya capacidad para reproducirse es más valiosa para la persistencia de la población que la contribución del macho. De hecho, los machos de la lagartija vivípara (*Lacerta vivipara*) compiten tan intensamente que su comportamiento agresivo y el hecho de que muerdan a las hembras reduce la longevidad de estas y el crecimiento de la población. Otro efecto más simple y tal vez poco estudiado es que, desde la perspectiva del crecimiento de la población, los machos grandes en desarrollo consumen recursos que podrían dedicarse a un mejor uso si se dejaran para las hembras.

¿Por qué la evolución no favorece la reproducción asexual, y se evitan así los tipos de lucha entre machos y hembras, que pueden tener un efecto negativo sobre la eficacia biológica de la población en su conjunto? En teoría, un linaje animal que se reproduce de forma asexual debería encontrarse finalmente con dificultades. Sin embargo, este año se ha informado de que el pez *Poecilia formosa* tiene un genoma de una calidad sorprendentemente buena, incluso después 500.000 generaciones de reproducción asexual. Muchos misterios evolutivos como este nos proporcionarán temas fascinantes de investigación para los años venideros.

El planteamiento de Martins y su equipo vence las dificultades de los intentos previos de medir cómo las diferencias entre sexos afectan a la eficacia biológica de la población. Un ejemplo lo hallamos en una técnica calificada

como evolución experimental, en la que la fuerza de la selección sexual se hace variar experimentalmente: en algunos linajes cautivos se restringen los apareamientos para que se produzcan solo en parejas monógamas, mientras que en otros linajes de la misma especie se permite que exista competición para el apareamiento. Otro enfoque implica la utilización de información sobre especies actuales e indicadores de la competición sexual, como el tamaño testicular o diferencias en el tamaño o en el color entre machos y hembras. Estos indicadores son comparados posteriormente con el riesgo estimado de extinción de la especie, tal como está documentado en la Lista Roja creada por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza, o con los niveles de reemplazo de población. Sin embargo, tales métodos adolecen de algunos inconvenientes. En algunas ocasiones, la evolución experimental se lleva a cabo en un ambiente simplificado de laboratorio, mientras que las amenazas actuales a la persistencia de las especies tienen, a menudo, causas relacionadas con la intervención humana. En cambio, Martins y su equipo han logrado demostrar los riesgos de las diferencias pronunciadas entre sexos durante un período extenso antes de que aparecieran los humanos sobre la Tierra.

Podemos dar las gracias a la selección sexual por la existencia de rasgos tan maravillosos como la cola del pavo real, la danza del cortejo de los machos de las arañas pavo real del género *Maratus* y, sin duda, la forma alargada de los ostrácodos machos. Sin embargo, tal como ha demostrado Martins, las diferencias sexuales pueden acarrear consecuencias negativas para las especies. Con más de 10.000 especies de ostrácodos que viven todavía (incluidas las asexuales), es sorprendente lo poco que conocemos sobre su genética o sobre otros factores demográficos que afectan al modo en que estas poblaciones progresan, incluyendo las condiciones bajo las cuales se reproducen o sobreviven. ¿Por qué las diferencias entre machos y hembras de ostrácodos dieron como resultado un incremento del riesgo de extinción? ¿Alguien se atreve a probar con la evolución experimental?

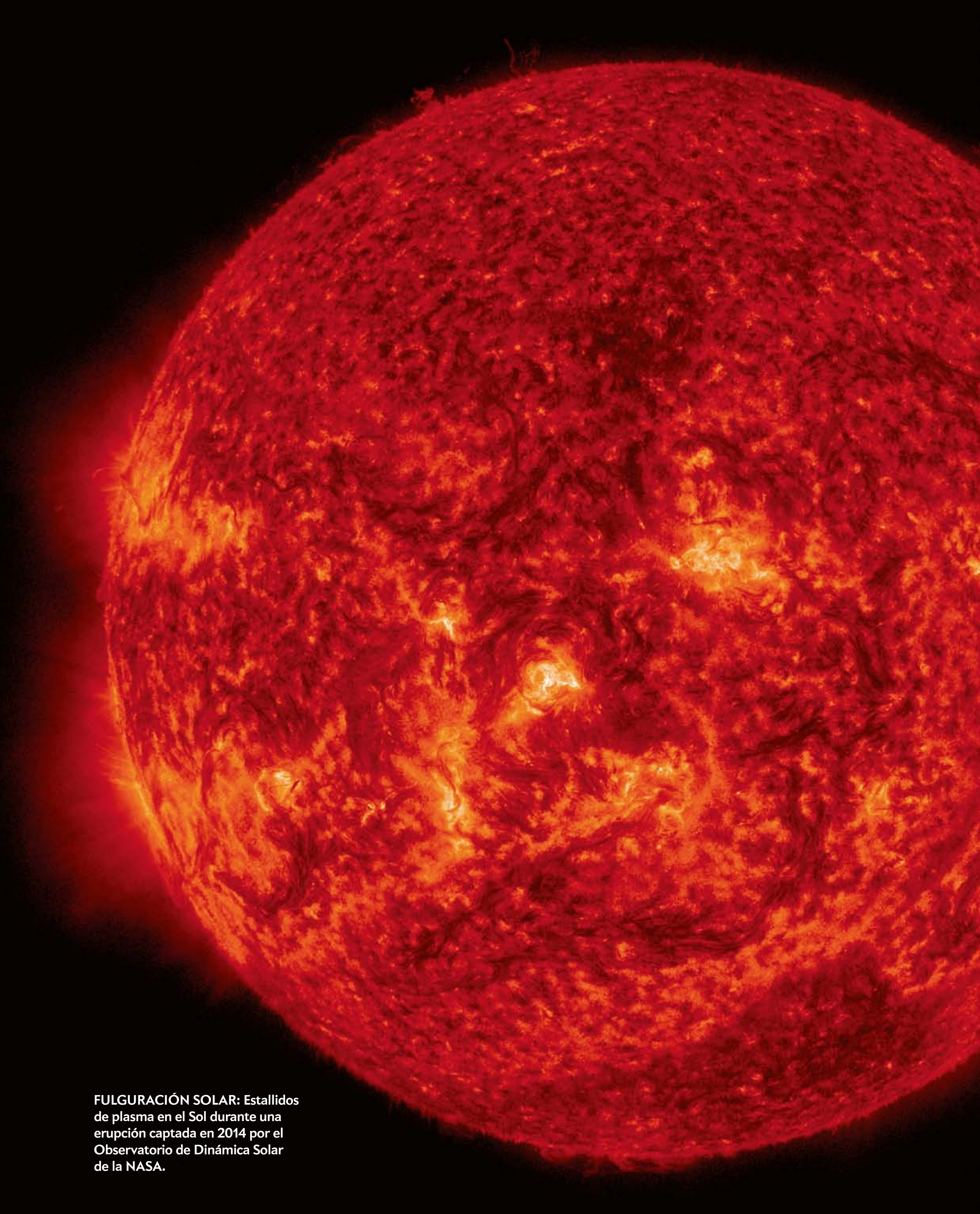
Hanna Kokko
es catedrática del Departamento de Biología Evolutiva y Estudios Ambientales de la Universidad de Zúrich

Artículo original publicado en *Nature* vol. 556, págs. 315-316, 2018.
Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2018

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Sexy to die for? Sexual selection and the risk of extinction. H. Kokko y R. Brooks en *Annales Zoologici Fennici*, vol. 40, págs. 207-219, 2003.
Sexual selection protects against extinction. A. J. Lumley et al. en *Nature*, vol. 522, págs. 470-473, 2015.
Population genetics of sexual conflict in the genomic era. J. E. en *Nature Reviews Genetics*, vol. 18, págs. 721-730, 2017.
High male sexual investment as a driver of extinction in fossil ostracods. M. J. F. Martins et al. en *Nature*, vol. 556, págs. 366-369, 2018.



FULGURACIÓN SOLAR: Estallidos de plasma en el Sol durante una erupción captada en 2014 por el Observatorio de Dinámica Solar de la NASA.

ASTRONOMÍA

LA VIDA SECRETA DEL SOL

La biografía de nuestra estrella es mucho más compleja de lo que se suponía. Nuevas investigaciones iluminan el pasado y el posible futuro del Sol

Rebecca Boyle

Rebecca Boyle es periodista científica. Escribe como colaboradora para la revista *The Atlantic* y su trabajo aparece regularmente en *New Scientist, Wired, Popular Science* y otras publicaciones. Sus publicaciones han sido recogidas en la serie *The best American science and nature writing*.



La vida del Sol, por capítulos

EN EL PRINCIPIO

no había nada más que frío y oscuridad entre los átomos que acabarían convirtiéndose en el sistema solar. Hace 4600 millones de años no existía el Sol, solo una rala nube formada por los restos de estrellas más antiguas, con elementos forjados en cataclismos anteriores. Entonces, sucedió algo.

Quizá la gravedad de algún nómada celeste sacudió la nube. O tal vez el viento de una estrella más distante arrastró sus átomos, como la brisa amontona las hojas. Sea como fuere, estos comenzaron a concentrarse hasta que el material se calentó lo suficiente para que el hidrógeno se fusionara y se convirtiera en helio. Había nacido el Sol, y no mucho después lo haría la Tierra. Menos de mil millones de años más tarde surgieron las primeras formas de vida, al menos en este planeta. Y aquí estamos hoy.

Esta historia es la que ha contado la ciencia durante décadas: el nacimiento del Sol, una época aburrida y luego la aparición de la vida. Sin embargo, los nuevos telescopios espaciales, el floreciente campo de la cosmoquímica y algunas técnicas genealógicas inspiradas en la biología están ayudando a reescribir una biografía mucho más rica. Hoy sabemos que nuestra estrella no siempre fue solitaria. Una vez tuvo hermanas, e incluso podría haber adoptado uno de sus planetas. Y también tuvo, a falta de una palabra menos antropomórfica, una madre: una estrella gigante cuya corta vida enriqueció el material embrionario del sistema solar. Dicho material pudo haber permanecido aislado del resto de la galaxia durante al menos 30 millones de años; una gestación prolongada que no deja traslucir lo rápido que el Sol formó los planetas.

Incluso la futura muerte del Sol está adquiriendo una nueva dimensión. Dentro de unos 5000 millones de años agotará sus reser-

EN SÍNTESIS

Hubo un tiempo en que los astrónomos pensaban que el Sol era una estrella corriente de vida poco interesante.

Sin embargo, se ha descubierto que el Sol tuvo una «madre» y un buen número de «hermanas», a una de las cuales incluso podría haberle robado un planeta.

Al morir, algunas estrellas similares al Sol pueden sembrar material para futuras generaciones estelares. Los investigadores aún ignoran si ese será el destino del Sol.

ANTEPASADAS
El Sol pudo haber tenido una «madre»: una estrella gigante nacida unos millones de años antes, la cual habría acabado sus días en una violenta explosión de supernova (*mostrada aquí*). Previamente, su viento habría sembrado y concentrado parte del material a partir del cual se formaron el Sol y los planetas del sistema solar. Dicha estrella ha sido bautizada como Coatlicue, la madre del Sol en la cultura azteca.

PÁGINAS ANTERIORES: OBSERVATORIO DE DINÁMICA SOLAR DE LA NASA Y EQUIPOS CIENTÍFICOS DE LOS INSTRUMENTOS AIA, EVE Y HMI; ESTA PÁGINA: RON MILLER



HERMANAS

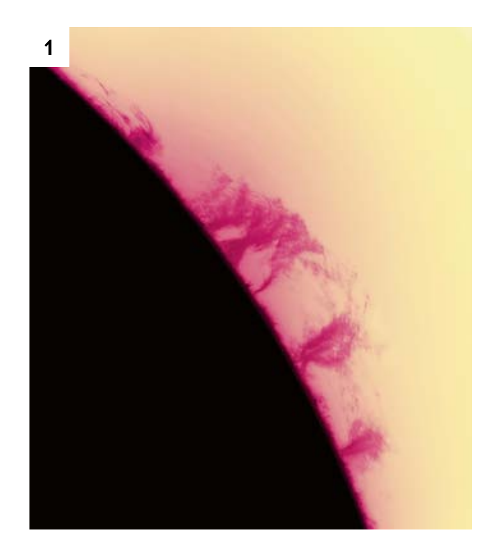
El Sol nació en una nube de gas y polvo cuando el material se concentró lo suficiente para que se iniciase la fusión nuclear. Esa nube probablemente engendró entre unos cientos y unas decenas de miles de estrellas: las compañeras de camada del Sol (*representadas aquí*). Con el tiempo, esas estrellas se habrían dispersado, aunque hace poco los astrónomos creen haber localizado a una de ellas.

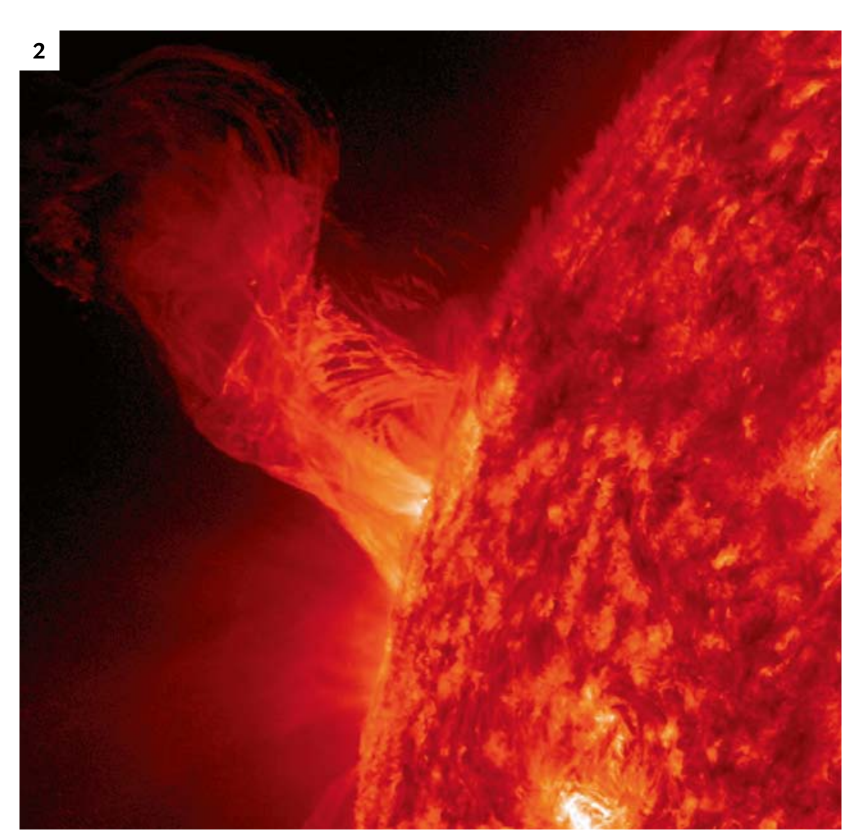
INFANCIA

Cuando el Sol era aún joven, los granos de polvo que giraban a su alrededor se juntaron y formaron pequeños cuerpos. En tan solo un millón de años se habrían formado los asteroides, y en otro millón de años quizá apareciesen los primeros planetas rocosos. La Tierra pudo haberse formado entre 38 y 120 millones de años después del nacimiento del Sol.

MUERTE

Dentro de unos 5000 millones de años, el Sol llegará al final de su vida. Sus capas exteriores se hincharán y acabarán formando una brillante nebulosa planetaria, en cuyo centro quedará una enana blanca, una estrella pequeña y densa. Para entonces, la Tierra y los planetas interiores habrán desaparecido, engullidos por el Sol durante sus últimos años. Los asteroides del sistema solar exterior, como los objetos del cinturón de Kuiper (*representados en la parte inferior*), seguirán existiendo.





ESTAS PROTUBERANCIAS SOLARES fotografiadas en 2013 (*1*) y 2012 (*2*) se elevaron unos 50.000 y 260.000 kilómetros, respectivamente, sobre la superficie de la estrella.

ALAN FRIEDMAN (1); OBSERVATORIO DE DINÁMICA SOLAR DE LA NASA Y EQUIPOS CIENTÍFICOS DE LOS INSTRUMENTOS AIA, EVE Y HMI (2)

vas de hidrógeno, se enfriará y se hinchará hasta convertirse en una gigante cuyo borde exterior podría tragarse la Tierra. Pero aún se ignora cómo afectarán los estertores del Sol al medio interestelar, a la formación de futuras estrellas y a la galaxia en su conjunto. Es posible que el propio Sol se convierta en «madre» y propicie la formación de nuevas estrellas, y quizá se rodee de nuevos planetas antes de morir.

Aprender más sobre el pasado, el presente y el futuro del Sol no solo está reescribiendo nuestra historia. Solo hay una estrella que podemos conocer de cerca. Lo que averigüemos sobre ella arrojará luz sobre las demás.

EL ÁRBOL GENEALÓGICO DEL SOL

Decenas de millones de años antes de que se encendiera el Sol, sus antepasadas dominaban el vecindario galáctico. Estas fueron las tatara...tataranietas de las primeras estrellas de la galaxia, y en su generación había decenas de miles de ellas. Unos pocos millones de años después de nacer, algunas comenzaron a morir. Sus violentos finales sembraron el entorno con elementos pesados, como el hierro y el aluminio. Los restos de estos astros dieron lugar a generaciones posteriores de estrellas; entre ellas, las antepasadas del Sol.

Los astrónomos pueden reconstruir esta historia gracias a los meteoritos, residuos de la creación del sistema solar. Para ello, comparan las cantidades que presentan de varios isótopos radiactivos con las que hay en el medio interestelar, el cual se va reponiendo constantemente a medida que agonizan las estrellas. Las abundancias de estos materiales radiactivos, las cuales disminuyen en escalas de tiempo conocidas, funcionan como un reloj que permite determinar cuándo estuvieron presentes los componentes básicos del sistema solar.

Algunos de esos radioisótopos, entre ellos el aluminio 26, permitieron a Matthieu Gounelle, del Museo Nacional de Historia Natural de Francia, y Georges Meynet, del Observatorio de Ginebra, remontarse en el árbol genealógico del Sol. El aluminio 26 tiene un período de semidesintegración de unos 730.000 años, lo que significa que la mitad de una muestra dada se habrá desintegrado pasado ese tiempo. Se encuentra en meteoritos que datan de los primeros tiempos del sistema solar, y muchos astrónomos creen que pudo originarse en una supernova que habría explotado cerca del Sol mientras este se estaba formando. En 2012, sin embargo, Gounelle y Meynet argumentaron que dicho radioisótopo pudo haberse generado en el interior de una enorme estrella previa: la «madre» del Sol.

Dicha estrella habría sido una de las mayores de nuestro rincón galáctico, con una masa unas 30 veces mayor que la del Sol. Al igual que otras estrellas gigantes, habría tenido una vida corta pero espectacular, cuyo fin llegó en forma de explosión a los pocos millones de años después de encenderse. Antes, sin embargo, su viento no solo habría aportado el aluminio 26, sino que habría concentrado hidrógeno y otros elementos en la nube de gas que más tarde se convertiría en el sistema solar. Los investigadores llamaron a esta estrella Coatlicue, la madre del Sol en la cosmogonía azteca.

Investigaciones posteriores han aportado nuevas pistas sobre otras sustancias presentes en el sistema solar. En 2014, un grupo de Australia mostró que el último contingente de algunos de los metales pesados de la Tierra y los meteoritos, como el oro, la plata y el platino, llegó a nuestro entorno unos 100 millones de años antes del nacimiento del Sol. Por otro lado, la última fracción de los elementos del grupo de las tierras raras, como el neodimio, fue aportada al entorno gestacional del Sol unos 30 millones de años antes de que este se formara. Por tanto, cabe inferir que nuestra estrella estuvo en incubación durante un período prolongado, el cual podría haber sido de hasta 30 millones de años.

Aunque es imposible viajar atrás en el tiempo para verificar esta historia, los astrónomos pueden compararla con la de otros sistemas planetarios con composiciones químicas similares, ex-

plica Megan Bedell, astrofísica del Instituto Flatiron de Nueva York. Y la línea de tiempo parece encajar: «Estamos estudiando el Sol en su contexto, comparándolo con sus vecinas, y vemos que es una estrella bastante típica dadas las condiciones en que se formó», añade.

Además de seguir el rastro de las antepasadas del Sol, los científicos también han usado herramientas inspiradas en la biología para buscar a sus primas, tías y otras parientes, y reconstruir su árbol genealógico en un sentido más amplio. Al igual que un botánico puede usar el ADN o los caracteres heredados para relacionar una especie de planta con otra, los astrónomos investigan las relaciones entre diferentes estrellas estudiando en cada una de ellas los cocientes entre las abundancias de determinados elementos químicos. En 2001, Didier Fraix-Burnet, que ahora investiga en el Instituto de Planetología y Astrofísica de Grenoble, fue uno de los primeros en proponer esta técnica. La denominó «astrocladística» debido a la cladística, un método usado por los biólogos que se basa en agrupar las especies determinando aquellas que tienen un mismo último antepasado común. El año pasado, Paula Jofré, de la Universidad Diego Portales, de Santiago de Chile, y sus colaboradores utilizaron este tipo de técnicas para reconstruir un árbol evolutivo estelar del vecindario del Sol.

El equipo de Jofré, con la colaboración de un biólogo de la Universidad de Cambridge, empleó el método de las distancias genéticas. Este se basa en construir un árbol en el que las diferentes ramas indican cambios evolutivos. En astronomía, las ramas representan poblaciones estelares con diferentes edades y patrones de movimiento a través de la galaxia. Imaginemos dos generaciones de estrellas. La primera tiene dos estrellas, una de gran masa y otra pequeña. La de gran masa explotará mucho antes de que la segunda muera y dará lugar a una estrella de segunda generación. «La segunda generación lleva información sobre la primera. Están, de algún modo, conectadas "genéticamente"», explica Jofré. «De esta manera podemos encontrar a una estrella y a su tía.»

Jofré y sus colaboradores examinaron el Sol y 21 estrellas cercanas y similares a él, y se centraron en 17 elementos químicos, los cuales usaron a modo de ADN para determinar las relaciones genealógicas. Su análisis agrupó las estrellas en función de los cocientes entre las abundancias de esos elementos y las clasificó en dos familias bien conocidas. También descubrieron algunas estrellas que pertenecían a un tercer grupo desconocido hasta entonces y que, según Jofré, aún resulta desconcertante.

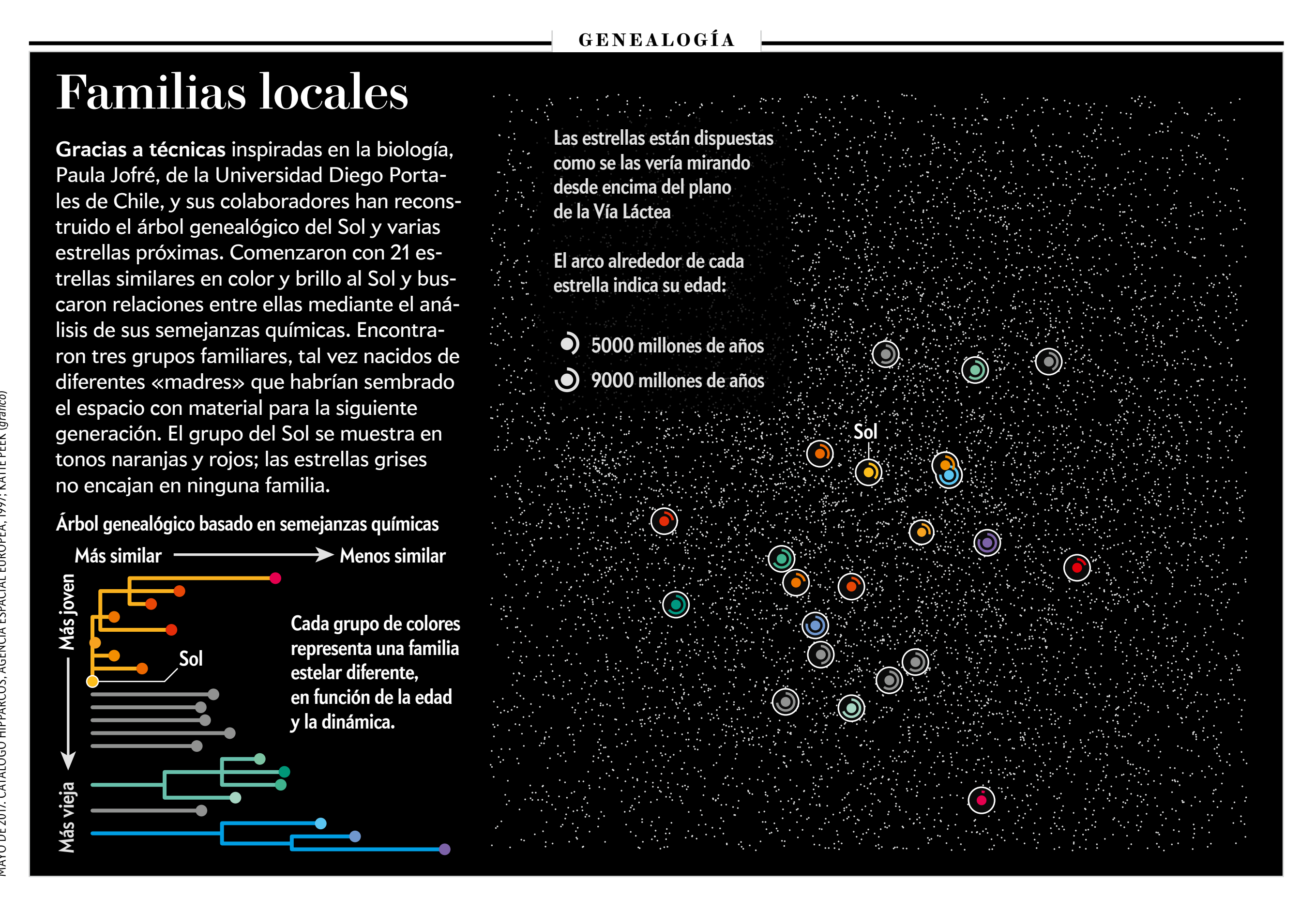
EL NACIMIENTO DE UNA ESTRELLA Y SUS HERMANAS

Desde el nacimiento de Coatlicue y sus antepasadas, unas pocas decenas de millones de años antes de que se formara el Sol, la situación se mantuvo animada en la nube natal. El gas colapsó y entró en ignición, lo que dio lugar a otras estrellas. A medida que se encendían, la presión de sus vientos estelares y su luz habría empujado el gas hacia el exterior, desencadenando con el tiempo el nacimiento de aún más estrellas: el Sol y sus compañeras de camada, las cuales podrían haber sido entre unos cientos y unas decenas de miles. Parece probable que sea el menor de estos números el que más se acerque a la realidad, ya que los planetas del sistema solar presentan una alineación bastante estable. Sin embargo, unas hermanas demasiado cercanas habrían perturbado el sistema solar y alterado el número y la disposición de sus planetas.

GENEALOGÍA

Familias locales

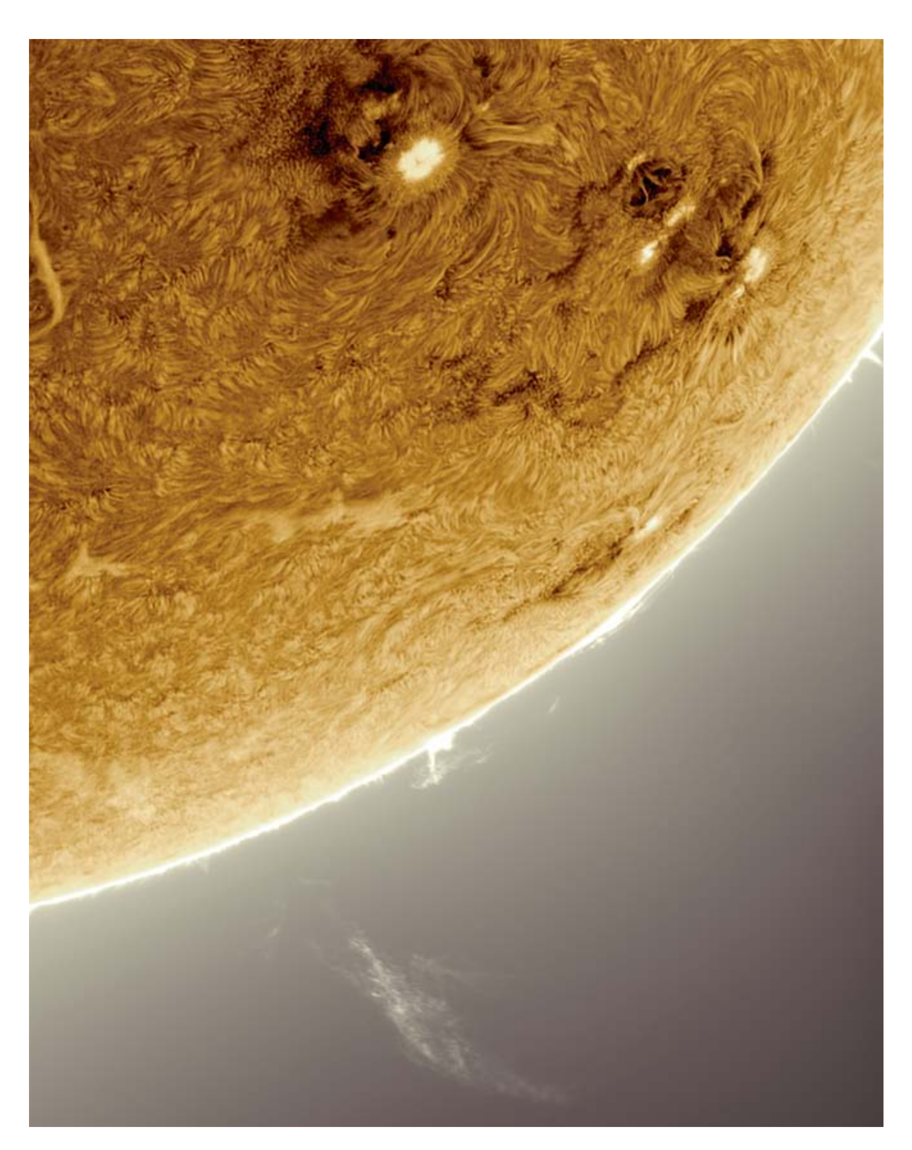
Gracias a técnicas inspiradas en la biología, Paula Jofré, de la Universidad Diego Portales de Chile, y sus colaboradores han reconstruido el árbol genealógico del Sol y varias estrellas próximas. Comenzaron con 21 estrellas similares en color y brillo al Sol y buscaron relaciones entre ellas mediante el análisis de sus semejanzas químicas. Encontraron tres grupos familiares, tal vez nacidos de diferentes «madres» que habrían sembrado el espacio con material para la siguiente generación. El grupo del Sol se muestra en tonos naranjas y rojos; las estrellas grises no encajan en ninguna familia.



FUENTES: «COSMIC PHYLOGENY: RECONSTRUCTING THE CHEMICAL HISTORY OF THE SOLAR NEIGHBOURHOOD WITH AN EVOLUTIONARY TREE», PAULA JOFRÉ ET AL. EN *MONTHLY NOTICES OF THE ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY*, VOL. 467, N.º 1, MAYO DE 2017. CATÁLOGO HIPPARCOS, AGENCIA ESPACIAL EUROPEA, 1997; KATIE PEEK (*gráfico*)

Aunque unas nacieron cerca de otras, las hermanas del Sol se marcharon hace ya tiempo. Con el paso de los eones, algunas estallaron y cayeron en el olvido, mientras que otras se fueron alejando debido a las pequeñas diferencias en la velocidad con que orbitan en torno al centro de la galaxia. Resulta casi imposible conectar sus posiciones actuales con su lugar de origen. «Es como lo que nos sucedió a mi hermano gemelo y a mí: crecimos juntos, pero después nuestros caminos se separaron por completo», ejemplifica Keith Hawkins, astrónomo de la Universidad de Columbia. Con todo, Hawkins explica que el «etiquetado químico», también conocido como cosmoquímica (por ejemplo, la técnica consistente en comparar los cocientes entre las abundancias de ciertos elementos presentes en las estrellas), permite identificar conexiones entre estrellas que de otro modo resultarían invisibles.

En 2014, Iván Ramírez buscó las compañeras de camada del Sol y encontró una. Ramírez, hoy profesor en el Colegio Universitario de Tacoma, en Washington, partió de unas 30 candidatas, las cuales eligió a partir de su composición química y de la dirección y velocidad con que se mueven a través de la Vía Láctea. Tras un análisis más detallado, se quedó con una sola: HD 162826. Su masa es un 15 por ciento mayor que la del Sol, y su luz solo un poco más azul. Aunque el Sol y su hermana se habrían formado muy cerca, hoy HD 162826 se halla a 110 años luz, en la constelación de Hércules. Puede verse con unos prismáticos decentes de pocos aumentos, sobre el hombro de Hércules y no muy lejos de la brillante Vega.



LAS REGIONES ACTIVAS DEL SOL, donde se arremolinan los campos magnéticos, forman manchas solares, mostradas aquí en blanco. En la mayor de ellas podrían caber varias Tierras. En la parte inferior de la imagen puede verse una gran protuberancia que se ha desprendido y se aleja volando.

ALAN FRIEDMAN

Ramírez relata que comenzó su búsqueda en parte por puro interés, pero también porque quería poner a prueba las estrategias para manejar el gigantesco conjunto de datos obtenidos por el satélite Gaia. Este instrumento de la Agencia Espacial Europea mide el brillo de las estrellas y su posición exacta en el cielo. Su última remesa de datos, publicada en abril de este año, incluye mediciones precisas de más de 1300 millones de estrellas de la Vía Láctea.

Ramírez cree que Gaia ayudará a descubrir alrededor de la mitad de las compañeras de camada del Sol. Ello permitirá conocer mejor el entorno en el que se gestó nuestra estrella y el camino que han recorrido esos astros desde entonces. Hoy, el Sol orbita alrededor del centro galáctico a unos 200 kilómetros por segundo, y se piensa que habrá dado al menos 20 vueltas a la galaxia.

INFANCIA Y FORMACIÓN DE LOS PLANETAS

No mucho después de que nacieran el Sol y sus hermanas, los granos de polvo que rodeaban a esas estrellas comenzaron a unirse para formar planetas. Al menos en nuestro sistema solar, ese proceso tuvo lugar con rapidez. Los estudios con meteoritos indican que, una vez que la materia sólida se concentró, la primera generación de asteroides apareció en menos de un millón de años. Gracias principalmente a la desintegración del aluminio 26, los trozos de roca se calentaron y se diferenciaron internamente, con un núcleo de metal y un manto de silicatos. Marte pudo haberse formado en 2 millones de años, y la Tierra, entre 38 y 120 millones de años después que el Sol.

Puede que por entonces el Sol apresase un planeta de una de sus hermanas. El Planeta Nueve, un hipotético cuerpo gigante que algunos astrónomos creen que podría ocultarse en las zonas más alejadas del sistema solar, podría ser un primo de nuestro planeta adoptado por el Sol 100 millones de años después de encenderse. Para ello, el Planeta Nueve habría tenido que orbitar a gran distancia de su estrella original, entre 100 y 500 veces mayor que la que existe entre la Tierra y el Sol; es decir, entre 100 y 500 unidades astronómicas. Al mismo

tiempo, esa estrella habría tenido que pasar a una distancia de no más de 1500 unidades astronómicas del Sol. Este tipo de encuentros ocurren con relativa frecuencia en otros cúmulos estelares. Si los planetas del tamaño de Neptuno son comunes, entonces es probable que muchas estrellas alberguen mundos como el Planeta Nueve en órbitas muy excéntricas, lo que los haría vulnerables a un «secuestro» por parte de otras estrellas.

En 2016, Alexander Mustill y Melvyn Davies, de la Universidad de Lund, y Sean Raymond, de la Universidad de Burdeos, calcularon que el Sol podría haber tenido varias oportunidades para hacerse con el Planeta Nueve. Incluso es posible que el Sol atrapara a este mundo sin perturbar el cinturón de Kuiper, el anillo de pequeños cuerpos y planetas enanos situados más allá de Neptuno.

El Planeta Nueve, un hipotético cuerpo gigante que podría esconderse en los arrabales del sistema solar, quizá sea un «primo» adoptado por el Sol

Un estudio más detallado de los objetos del sistema solar exterior ayudará a descubrir el origen del Planeta Nueve, si es que existe. Y, de ser así, puede que este no fuera el único intruso que se haya acercado o unido a la familia del Sol. En 2015, Eric Mamajek, por entonces en la Universidad de Rochester, y sus colaboradores demostraron que, hace 70.000 años, cuando *Homo sapiens* salía de África y los neandertales aún poblaban la Tierra, una estrella llamada Scholz entró en la nube de Oort, la capa esférica de planetesimales helados situada mucho más allá de la órbita de Plutón. Esta estrella se acercó a menos de un año luz del Sol y reconfiguró la trayectoria de algunos objetos de la nube de Oort, según un estudio de 2018 dirigido por Carlos de la Fuente Marcos, de la Universidad Complutense de Madrid. Hoy, esa estrella se encuentra a casi 20 años luz de distancia. Por otro lado, en otoño de 2017 recibimos una breve visita del primer viajero conocido de más allá del sistema solar: el asteroide o cometa interestelar 'Oumuamua. No obstante, esta roca viajaba demasiado deprisa para unirse a la cuadrilla del Sol.

Mientras se formaban los planetas, el Sol seguía cambiando. Bedell y sus colaboradores examinaron un conjunto de estrellas que no pertenecen necesariamente a la familia originaria del Sol pero cuyas composiciones químicas sí son muy similares a la de este. Descubrieron que el Sol se sale ligeramente de la norma en un aspecto clave: sus capas exteriores presentan una menor cantidad del material que forma los cuerpos rocosos, siendo la cantidad que falta equivalente a unas pocas veces la masa de la Tierra. Según Bedell, es posible que ese material quedase atrapado en los planetas terrestres o en el núcleo de los gigantes gaseosos. De ser el caso, el proceso de formación de los planetas habría transformado el Sol, de modo similar a como el parto cambia el cuerpo de una mujer.

Este hallazgo tal vez ofrezca una manera de buscar exoplanetas. Si otras estrellas parecidas al Sol tienen una cantidad de material polvoriento menor de la esperada, ello podría deberse a la existencia de planetas a su alrededor, observa Bedell.

EL FINAL

Un día, dentro de unos 5000 millones de años, el Sol agotará el hidrógeno que usa como combustible. Dejará de ser una estrella de tamaño mediano y color amarillento para convertirse con rapidez en una gigante roja, y engullirá los dos, tres o tal vez los cuatro planetas más próximos. La Tierra quedará cerca o incluso por debajo de la superficie de ese Sol envejecido. A medida que se expanda, llegará un momento en que su campo gravitatorio no sea capaz de retener sus gigantescas y difusas capas externas y su atmósfera se irá flotando.

«El Sol se convertirá en una hermosa nebulosa planetaria con una enana blanca en el centro», señala Hawkins. Esa enana blanca, una masa pequeña y densa que contendrá lo que haya quedado del núcleo del Sol, se enfriará y navegará por la galaxia durante un sinnúmero de eones.

¿Podría el Sol, durante esos estertores, formar una nueva familia? En 2016, Hans Van Winckel y Michel Hillen, de la Universidad Católica de Lovaina, argumentaron que las estrellas como el Sol podrían dar lugar en su vejez a una nueva tanda de planetas. Con ayuda del telescopio VLT, en el desierto chileno de Atacama, divisaron un disco de polvo alrededor de una estrella moribunda que se asemejaba a los discos protoplanetarios que rodean a las estrellas recién nacidas. Parece, pues, que algunas estrellas sí podrían tener una segunda oportunidad de crear mundos. Sin embargo, parece más probable que esa situación se dé en sistemas binarios, lo que no es el caso del Sol.

Cuando nuestra estrella muera, el material que haya expelido acabará dispersándose por el medio interestelar, donde es poco probable que se tope con una cantidad suficiente de material adicional para dar lugar a una nueva estrella, afirma Bedell. «Es más poético decir que se difundirá y se convertirá en parte de una próxima generación», señala la investigadora. Pero, probablemente, sufrirá «una muerte silenciosa en la región semiexterior de la galaxia», añade. No quedará mucho de él para contar su agitada vida anterior.

Mientras tanto, estamos aquí. Todo lo que aprendamos acerca del Sol no solo nos informará sobre nuestro rincón cósmico, sino que también nos ofrecerá una ventana a las muchas estrellas que jamás podremos estudiar de cerca. «En ocasiones he escuchado decir que, en términos generales, las estrellas son un problema resuelto», continúa Bedell. «Pero aún hay muchas cosas que no entendemos.» Poco a poco, el Sol está ayudando a que eso cambie. IyC

PARA SABER MÁS

On the probable origin and age of the Sun. James Croll en *Scientific American*, vol. 4, n.º 86 supp., agosto de 1877.
Solar system genealogy revealed by extinct short-lived radionuclides in meteorites. Matthieu Gounelle y Georges Meynet en *Astronomy & Astrophysics*, vol. 545, art. n.º A4, septiembre de 2012.
Elemental abundances of solar sibling candidates. Iván Ramírez et al. en *The Astrophysical Journal*, vol. 787, n.º 2, art. n.º 154, junio de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Las hermanas del Sol. Simon F. P. Zwart en *IyC*, enero de 2010.
El origen astroquímico de los sistemas planetarios y la vida. Rafael Bachiller en *IyC*, abril de 2015.
Nacido del caos. Konstantin Batygin, Gregory P. Laughlin, Alessandro Morbidelli, en *IyC*, julio de 2016.
La formación de los planetas del sistema solar. Linda T. Elkins-Tanton en *IyC*, febrero de 2017.



NEUROCIENCIA

SOBRE-ESTIMULAR A LOS BEBÉS

Cientos de juguetes se publicitan como útiles para el aprendizaje, la lectura, la aritmética e incluso para dar los primeros pasos, pretensión que en buena parte carece de base científica

Erik Vance

FOTOILUSTRACIÓN DE DAN SAELINGER

EN SÍNTESIS

Los juguetes educativos se publicitan sin cesar proclamando que ayudan a que el bebé aprenda, lea, haga cálculos y camine antes, pero las pruebas científicas son escasas.

Incluso de ser cierto que el progreso se acelerase, los estudios no demuestran que tal avance brinde ventajas a la larga.

Las imágenes televisivas y los vídeos acelerados pueden dificultar la capacidad del bebé para comprender el ritmo natural de las cosas, lo que puede conllevar problemas de atención.

El mayor beneficio del juego proviene de la interacción con otro ser humano; así que los padres deberían buscar tiempo para compartir con sus hijos.

Erik Vance es escritor científico y padre primerizo. Su primer libro, *Suggestible you* («Sugestionable») (National Geographic, 2016), habla sobre la influencia de las creencias en el cerebro.



CUANDO EL HIJO DE SETH POLLAK

CUMPLIÓ UN AÑO, SU MUJER Y ÉL se acercaron a una conocida cadena de jugueterías, no lejos de su casa en Madison, Wisconsin, para comprar un mordedor; nada especial, un aro de dentición refrigerante con el que aliviar el dolor de encías. Después de atravesar pasillos repletos de bicicletas y peluches, llegaron a la estantería buscada. Tomaron un paquete con un aro, nada barato, en el que se leía: «Fomenta la motricidad bucal y el desarrollo del lenguaje».

La pareja nunca había oído semejante reclamo publicitario, a pesar de que parecía importante. Unos padres corrientes, preocupados por que sus hijos puedan padecer algún retraso del desarrollo, podrían haber comprado el producto sin pensárselo dos veces. Pero Pollak y Saffran no son unos padres típicos. «Mi mujer es una de las mayores expertas en el desarrollo del lenguaje y ambos somos doctores en psicología del desarrollo. Cuando lo vimos, pensamos: «¿Pero qué es esto? ¿Cómo es posible que morder algo frío fomente el lenguaje?», explica Pollak.

No hay pruebas que lo demuestren. Y ese reclamo publicitario es solo un ejemplo de lo alejadas que están la investigación científica y la publicidad comercial en lo que concierne al desarrollo infantil.

Todos los padres desean que su bebé aprenda cuanto antes mejor. ¿Por qué no recurrir a los juguetes para conseguirlo? Si tu hijo juega con el artilugio conveniente en el momento oportuno, según reza la estrategia de venta, tendrá más posibilidades de ser más listo y más hábil que otros bebés.

Pero la sola idea de que la finalidad de un juguete sea dotar a tu hijo de una ventaja «es no comprender la esencia de lo que ocurre en el desarrollo», explica Alison Gopnik, columnista y destacada psicóloga infantil de la Universidad de California en Berkeley. Aunque los expertos pudieran idear ese tipo de productos, «habríamos acabado con la razón de ser de la infancia», la cual, defiende, es que el niño madure por sí mismo.

Desde los móviles de cuna en blanco y negro que supuestamente captan la atención del bebé o las orugas electrónicas con las que aprende a programar, en Estados Unidos se ha desatado una fiebre por los juguetes que fomentan el desarrollo infantil. Pero ¿funcionan? Gopnik, como muchos otros psicólogos del desarrollo, cree que una gran distancia separa estos productos y la investigación científica. Con demasiada frecuencia, el reclamo publicitario del juguete se basa en pruebas dudosas o nulas.

A pesar de todo, la facturación de juguetes educativos crece con rapidez, y se calcula que en EE.UU. rondará los 4000 millones de euros en 2018, según la empresa de investigación Technavio. Los entendidos sostienen que el motivo es la profunda inseguridad de los padres. ¿Diste de mamar a tu hija demasiado tiempo? ¿No lo suficiente? ¿Llevas a tu hijo al colegio adecuado? Si tu bebé no gatea, no camina, no habla, no lee e incluso no hace cálculos matemáticos pronto, entonces es que lo está haciendo tarde.

«Los niños viven rodeados de una cultura del pánico, de la preocupación: “Dios mío, te estás quedando atrás”», denuncia Barbara Sarnecka, científica del conocimiento de la Universidad de California en Irvine, que estudia la adquisición del lenguaje y de las aptitudes matemáticas.

Aunque los especialistas intentan con afán conocer el desarrollo del cerebro y ayudar a los bebés y niños pequeños que de veras sufren un retraso social o del desarrollo, muchos fabricantes de juguetes insinúan que es posible sobreestimular a todos los niños ¿Existen pruebas que sustenten esa afirmación?

MÁS PRONTO NO SIGNIFICA MEJOR

El *marketing* dirigido a las preocupaciones de los padres empieza en el mismo momento en que el espermatozoide alcanza el óvulo. Toda madre embarazada debe cuidar con esmero la alimentación, tomar vitaminas y controlar el estrés, no vaya a ser que un error tenga consecuencias perdurables para su hijo. Y por supuesto, su feto necesita la música adecuada.

Así es: la mejor manera de alcanzar grandes logros en la vida empieza con música en el útero. Multitud de artefactos con altavoces se ajustan al vientre gestante para que suene música. Babypod, uno de ellos, va más allá: es un altavoz de silicona con forma de bombilla que se introduce en la vagina. La página web del producto anuncia: «Nuestra hipótesis inicial sugiere

que la música activa los circuitos cerebrales que estimulan el lenguaje y la comunicación. En otras palabras, el aprendizaje empieza en el útero».

Es cierto que los bebés aprenden mientras están en el vientre y que la música es enriquecedora para el niño pequeño. Pero no hay pruebas de que ayude al feto. Los creadores de Babypod publicaron un artículo en *Ultrasound*, la revista de la Sociedad Británica de Ecografía Médica, que mostraba que los fetos reaccionaban con más intensidad al Babypod que a los altavoces externos, pero no concluía que esa reacción fuera positiva ni que el niño resultara más listo gracias a ella.

«No conozco nada que diga que semejante estimulación sea positiva para el bebé», explica Kathy Hirsh-Pasek, psicóloga del desarrollo de la Universidad Temple y presidenta del Congreso Internacional de Estudios Infantiles. Babypod no respondió a las numerosas preguntas al respecto.

Hirsh-Pasek es especialista en la adquisición del lenguaje en el bebé, un vasto campo de investigación y un objetivo goloso para la publicidad. Explica que cuelga en la pared de su despacho los anuncios que más le disgustan sobre juguetes dirigidos a padres ansiosos.

Hablar es quizás el mayor logro del niño y está ligado a las facultades cognitivas y a la memoria operativa que adquiere. Las investigaciones muestran que hay ciertos períodos en que estas capacidades experimentan avances vertiginosos y que la velocidad a la que se aprenden nuevas palabras predice la propensión a hablar en el futuro; los niños que son locuaces de pequeños tienden a seguir siéndolo cuando crecen.

Pero ¿cuanto antes, mejor? Durante décadas se ha intentado vincular la inteligencia con la capacidad temprana para hablar. Un estudio realizado en Ohio en 1982 descubrió que los hablantes precoces solían mostrar después un cociente intelectual más elevado. Ahora bien, lo interesante es que el efecto desaparecía cuando se eliminaban los sesgos motivados por los problemas cognitivos y la situación socioeconómica. Y ahí radica el quid de la cuestión, explica Hirsh-Pasek: hablar pronto o tarde no determina el éxito; en cambio, el código postal sí. La pobreza, la precariedad alimentaria y la violencia crean estrés, y el estrés retrasa el habla y provoca las futuras disparidades escolares. En muchos hogares con problemas, a los niños no se les habla lo suficiente y, por tanto, padecen una laguna lingüística que se convierte en una pérdida de rendimiento generalizada. Con todo, muchos fabricantes de juguetes convierten esa situación en una hipótesis infundada: como la falta de habla crea un déficit, el exceso de habla redundará en beneficio.

Sarnecka sostiene que es «tan solo una fantasía; una fantasía muy rentable». La estimulación mental para el niño pequeño es como las vitaminas; es importante tomar las necesarias, pero tomar más no es mejor. Aun así, las aplicaciones para teléfono móvil se cuentan por miles; y cada niño de 18 meses posee de promedio al menos siete DVD.

«Cuando crees haber visto lo peor, aparece otro producto en el mercado», lamenta Hirsh-Pasek. «Uno de mis favoritos, por supuesto, es *Tu bebé puede leer*. A lo que yo respondo: "No, no puede".»

Tu bebé puede leer constaba de una serie de fichas, vídeos y libros que aseguraban poder enseñar a leer a niños de entre tres meses y cinco años. El creador es Robert Titzer, un investigador que sostenía haber enseñado a sus dos hijas a leer cuando eran bebés. Los estudios científicos indican que a esas edades no se puede comprender la escritura. Pero la empresa comercializadora presentaba estudios y gráficos grandilocuentes, aunque no publicados en revistas científicas, y también brillantes testimonios, como el de un preescolar que leía libros de Harry Potter.

Hirsh-Pasek no fue la única que reparó en la entusiasta rotundidad de la publicidad. La Comisión Federal de Comercio estadounidense (FTC, por sus siglas en inglés), que supervisa las reclamaciones, abrió dos expedientes a Titzer, acusando de prácticas engañosas a las empresas con las que colaboraba.

Para recabar más información, los abogados de la FTC contactaron con la especialista en adquisición del lenguaje Susan Neuman, de la Universidad de Nueva York. Esta llevó a cabo un estudio aleatorizado y controlado en el que comparó 61 bebés que fueron expuestos a *Tu bebé puede leer* con otros 56 que no lo fueron y publicó los resultados en el *Journal of Educational Psychology*. A tenor de los 14 parámetros analizados, entre ellos el procesamiento del habla, el aprendizaje de palabras, el reconocimiento de las letras y la comprensión lectora, no halló diferencia alguna entre ambos grupos. Bueno, casi ninguna: los niños que usaron el programa no progresaron más que los demás; sus padres, en cambio, estaban convencidos de que sí.

Titzer, por su parte, me aseguró que nunca había participado en las decisiones de *marketing* y que jamás habría sugerido que los niños pequeños pudieran leer los libros de Harry Potter. Pero defiende su producto y afirma que Neuman no lo usó de manera correcta y que formulaba preguntas inadecuadas para evaluar el aprendizaje de los bebés.

Al final, en 2014, Titzer y las empresas colaboradoras llegaron a un acuerdo económico con la FTC de 800.000 dólares. La FTC también los amonestó con multas muy superiores si reincidían con reclamos publicitarios similares. En la actualidad, Titzer dirige Infant Learning Company, que vende un juego de DVD, tarjetas impresas y libros llamados *¡Tu bebé puede aprender!* y otro denominado *¡Tu pequeño puede leer!*

En cuanto al *marketing*, Titzer asegura que ha cambiado: «Tenemos bebés que *miran* libros. Todo el mundo recomienda que los bebés miren libros, así que no veo nada malo en que lo hagan».

Docenas de estudios indican que multitud de programas de aprendizaje basados en vídeos no arrojan resultados fiables. Titzer insiste en que la eficacia de sus productos es tangible y sostiene que está trabajando en una publicación que lo demuestra. Según la abogada de la FTC Annette Soberats, que contactó con un colega implicado en el caso de *Tu bebé puede leer*, su organismo da por zanjada la cuestión.

FICHAS + VÍDEOS = HABILIDADES MATEMÁTICAS

Por supuesto, los juguetes no existen fuera de un contexto. Hay cierta presión por parte de los consumidores para que sean educativos, sobre todo los dirigidos a los más jóvenes, explica Clement Chau, especialista en desarrollo infantil y director de la empresa de juguetes LeapFrog Enterprises. «Creo que hay cierta tendencia a pensar: "Quiero que mi hijo vaya a Harvard, así que le voy a comprar juguetes de LeapFrog y acabará yendo allí"», explica. Quizás este punto de vista sea poco realista, pero no es menos cierto que los juguetes pueden ser parte integrante del aprendizaje, añade Chaud.

Al final, no está claro que los padres que sobreestimulan a los bebés potencien sus capacidades a largo plazo. Al menos eso afirma David Barner. Y lo dice con pleno conocimiento de causa, ya que intentó como loco sobreestimular a su hija.

Barner es especialista en el desarrollo de la educación matemática infantil. Sabe que aprender matemáticas es importante

para los procesos cognitivos y abrirse paso en la vida. Así que deseaba que su hija de dos años se convirtiera en un genio de los números. Él mismo nunca despuntó en la disciplina —como su mujer, prefería la lectura—, pero era consciente de su importancia. Así que, a diario y durante meses, se dedicó a jugar con su hija utilizando productos a base de tarjetas, vídeos, juegos y cómics concebidos para enseñar matemáticas a los niños pequeños y preescolares de uno a cinco años.

Al final, aunque contempló con deleite cómo un cerebro joven asimila las matemáticas paso a paso, eso fue todo lo que consiguió. Y en el proceso, su hija acabó detestándolas. ¿Cuál resultó ser su verdadera pasión y vocación? La lectura, por supuesto.

Cuando toma la palabra como profesional, Barner opina que los padres ejercen menos influencia en los hijos que «otras cosas, tales como los amigos, la escuela a la que asisten o la posesión de recursos económicos». Muchas investigaciones, como la que se está llevando a cabo en la Universidad de Minnesota con gemelos separados, también muestran que la personalidad y las inclinaciones son sorprendentemente hereditarias.

El trabajo de Barner revela que muchos niños de entre tres y cinco años que saben contar y hasta parecen resolver sumas sencillas, en realidad no comprenden los rudimentos de la aritmética, sino que usan trucos memorísticos para dar con la respuesta. Aunque en EE.UU. a los niños muy pequeños se les enseña a contar con insistencia, sus habilidades matemáticas son pronto superadas por iguales de otros lugares como Asia.

EN BUSCA DEL ORO OLÍMPICO

No todos los padres desean que sus pequeños ganen la medalla Fields de los descubrimientos matemáticos. Algunos prefieren el oro olímpico. Y con esa meta, buscan potenciar el aprendizaje motriz.

«Si mi hijo caminara a los diez meses en lugar de a los trece, ¿tendría más posibilidades de jugar en un equipo de fútbol semiprofesional?, pregunta Karen Adolph, psicóloga infantil de la Universidad de Nueva York. «¿Acelerar las capacidades motrices da frutos a largo plazo?»

La disciplina del aprendizaje motriz es reducida en comparación con la del aprendizaje de las habilidades lingüísticas o matemáticas, por lo que muchas cuestiones básicas siguen abiertas. Pero algunas ideas parecen estar claras. La primera, por sorprendente que parezca, es que se puede sobreestimular la habilidad del bebé para que se siente, gatee e incluso camine. En 1935, la psicóloga Myrtle McGraw realizó un famoso ensayo con dos bebés gemelos; mientras al primero lo enseñaba a nadar, escalar y patinar, su hermano permanecía en la cuna. Pero tan pronto como McGraw permitió jugar también al segundo, este alcanzó a su hermano con rapidez. «Practicar las capacidades motrices las acelera a corto plazo. Pero no hay pruebas de que a largo plazo eso sirva para algo», explica Adolph.

Si uno quiere que su hijo sea el próximo Usain Bolt o Leo Messi, caminar o patear un balón desde tierna edad no servirá de mucho. Ahora bien, tales habilidades ofrecen algunas ventajas cognitivas; el niño que se sostenga sentado agarrará objetos más pronto, y el que camine explorará antes su entorno.

Adolph explica que hay otra diferencia clave entre la motricidad y las facultades cognitivas: a los padres que ella conoce en el laboratorio les interesa bastante menos el aprendizaje motriz de sus bebés, al igual que al sector de los juguetes. Nadie vende «*Tu bebé puede dar volteretas hacia atrás*». Algunos artículos, como pequeñas carretillas y andadores, afirman ser útiles para aprender a caminar, pero este aspecto casi no se publicita y se le concede más importancia a su vertiente lúdica. Si le das un sonajero a un niño, aprenderá a agitarlo. ¿Sería el primer paso para llegar a ser el batería de un célebre grupo de rock? No.

Adolph menciona a los famosos corredores tarahumara de México; empiezan a correr desde la infancia, pero no comienzan a gatear ni a caminar especialmente pronto. En la actualidad, la investigadora trabaja en Tajikistán, donde los bebés permanecen atados durante la mayor parte del día. Esta práctica retrasa el momento de empezar a caminar, pero los análisis preliminares no revelan diferencias con la capacidad locomotora de los niños occidentales en edad preescolar.

PRIMERO, APRENDER QUE LA GRAVEDAD EXISTE

Las investigaciones indican que sobreestimular a los bebés no los dota de mayores aptitudes. Pero eso no significa que la ciencia no brinde consejos sobre con qué deberían jugar.

El juego reviste suma importancia para el cerebro en desarrollo. Así como la comida nutre el cuerpo, el juego promueve el lenguaje, la cognición, el razonamiento espacial y otros talentos de un modo que aún intentamos entender. Y, como en la mesa, a veces las opciones más sencillas son las mejores.

Por ejemplo, los juegos de construcción con bloques aparecen a menudo en la bibliografía científica. Los niños que construyen objetos muestran un razonamiento espacial superior y, como dice un estudio controvertido, mejores capacidades matemáticas. Según los expertos, no hay nada milagroso en construir cosas; sencillamente es beneficioso jugar con pelotas, volquetes y rampas porque así se aprende la física de la gravedad, la forma o el movimiento. Horroriza ver cómo un bebé se precipita contra el suelo o contra una puerta cerrada, pero solo se trata de sus experimentos de física para averiguar cómo funciona la gravedad o si dos objetos pueden ocupar el mismo espacio.

Quizá los experimentos más concluyentes sean los que tratan con el fenómeno más enigmático: el tiempo. Sucede que los bebés no comprenden el tiempo mucho mejor que la gravedad o la inercia. A algunos expertos les preocupa que, si se aprende de forma distorsionada, la visión alterada tenga consecuencias duraderas.

Dimitri Christakis, psicólogo infantil de la Universidad de Washington, dirige un centro en el Hospital Pediátrico de Seattle. Estudia el efecto que tiene en los pequeños el tiempo que dedican a ver vídeos, un tema crucial ya que los pequeños usan cada vez más tabletas, teléfonos y ordenadores portátiles. Ha descubierto que la pantalla no es la fuente de los problemas, sino el ritmo de lo que ven en ella. Los juegos y dibujos animados que aceleran la acción o cambian de escena rápidamente pueden afectar al «metrónomo interno» del niño, un mecanismo que Christakis cree que surge en los tres primeros años para ayudar al individuo a comprender el ritmo del mundo. Si ese ritmo es



4000 MILLONES DE DÓLARES

Mercado de juguetes educativos en Estados Unidos

2800 MILLONES DE DÓLARES

Mercado mundial de aplicaciones educativas para edades de 0 a 4 años

7 o MÁS

Número de DVD de que dispone cada niño de 18 meses

MATHIAS DARMELL, GETTY IMAGES; FUENTES: *GLOBAL EDUCATIONAL TOYS MARKET 2017–2021*. TECHNAVIO, JULIO DE 2017 (*mercados*); «SCREEN MEDIA AND LANGUAGE DEVELOPMENT IN INFANTS AND TODLERS: AN ECOLOGICAL PERSPECTIVE», POR DEBORAH L. LINEBARGER Y SARAH E. VAALA EN *DEVELOPMENTAL REVIEW*, VOL. 30, N.° 2, JUNIO DE 2010 (*DVD*)

demasiado rápido, puede generar problemas de atención; así lo respaldan sus investigaciones en las que ha inducido déficit de cognición y atención en ratones.

Christakis compara los antiguos programas de televisión, como *El gran circo de TVE,* con los modernos y frenéticos dibujos animados o vídeos para niños, como los creados por la empresa Baby Einstein. Le preocupa no solo que la televisión y los videojuegos de hoy sean más rápidos, sino que sus usuarios sean más jóvenes. Hirsh-Pasek comparte la misma opinión. Su laboratorio también ha demostrado que, con independencia de lo interactivo que pueda ser un juego o un vídeo, nunca resultará tan beneficioso como la presencia de un ser humano, ya sea en persona o a través de una videollamada. La clave para que un juego sea «nutritivo» es otra persona que interactúe con el niño a un ritmo normal.

Chau, director de LeapFrog, coincide en que los vídeos no deberían reemplazar a la interacción humana, pero pueden formar parte del desarrollo del niño. Los bebés pueden jugar con una pantalla, en vez de con palancas o piezas, mientras no están interactuando con personas reales.

Pero a Christakis le preocupa que las pantallas provoquen perjuicios duraderos. Analizó en ratones con déficit de atención las partes del cerebro que usan glutamato, un neurotransmisor implicado en el aprendizaje y la memoria, y descubrió que mostraban conexiones con la adicción a la cocaína. La sobreestimulación provocó que los roedores experimentaran mayor disfrute y menor sensibilidad hacia la cocaína, y todavía más hiperactividad. Esto no significa que ocurra igual en la especie humana o que los niños sobreestimulados vayan a caer en las drogas, pero la adicción se basa en redes de recompensa del cerebro y en la adquisición de hábitos. Para comprender mejor estas ideas, Christakis está estudiando la adicción a la pantalla en niños de tan corta edad como dos años. Esto habría sido inaudito hace una década, pero asegura que lo ha detectado en casi el diez por ciento de los sujetos de estudio.

«Mi temor es que va a ir en aumento y que lo veremos a edades cada vez más tempranas, debido al incremento del número de niños que pasan tiempo ante la pantalla», advierte Christakis, y añade que «estos artefactos tienen muchas propiedades adictivas».

Parece que ciertos productos ocultan peligros. Y aun suponiendo que no sean dañinos, escasean los indicios de que aporten beneficios a largo plazo. Si lo que quiere es comprar un juguete interesante, busque alguno con el que usted querría jugar. Porque los expertos coinciden en que el tiempo que uno pasa en compañía del bebé, oyéndole a uno hablar e interactuar con el mundo, es la mejor educación que puede recibir.

Lo que nos lleva de nuevo a Pollak y Saffran. De pie ante la estantería de los mordedores, dudaban si intentar fomentar la motricidad bucal de su hijo. Tras soltar una gran carcajada, devolvieron el mordedor a su sitio.

«Fuimos al supermercado y compramos un paquete de rosquillas congeladas por 99 céntimos», explica Pollak. «Saqué una del congelador y se la di para que la masticara. El frío calmó el dolor de las encías y dejó de llorar.» IyC

PARA SABER MÁS

Becoming brilliant: What science tells us about raising successful children. Roberta Michnick Golinkoff y Kathy Hirsh-Pasek. Asociación Estadounidense de Psicología, 2016.

The gardener and the carpenter: What the new science of child development tells us about the relationship between parents and children. Alison Gopnik. Farrar, Straus y Giroux, 2016.

Blog de Gwen Dewar Parenting for the science-minded: **www.parentingscience.com**

EN NUESTRO ARCHIVO

Así piensan los bebés. Allison Gopnik en *IyC*, septiembre 2010.

Técnicas para la estimulación del aprendizaje. Gary Stix en *IyC*, octubre de 2011.

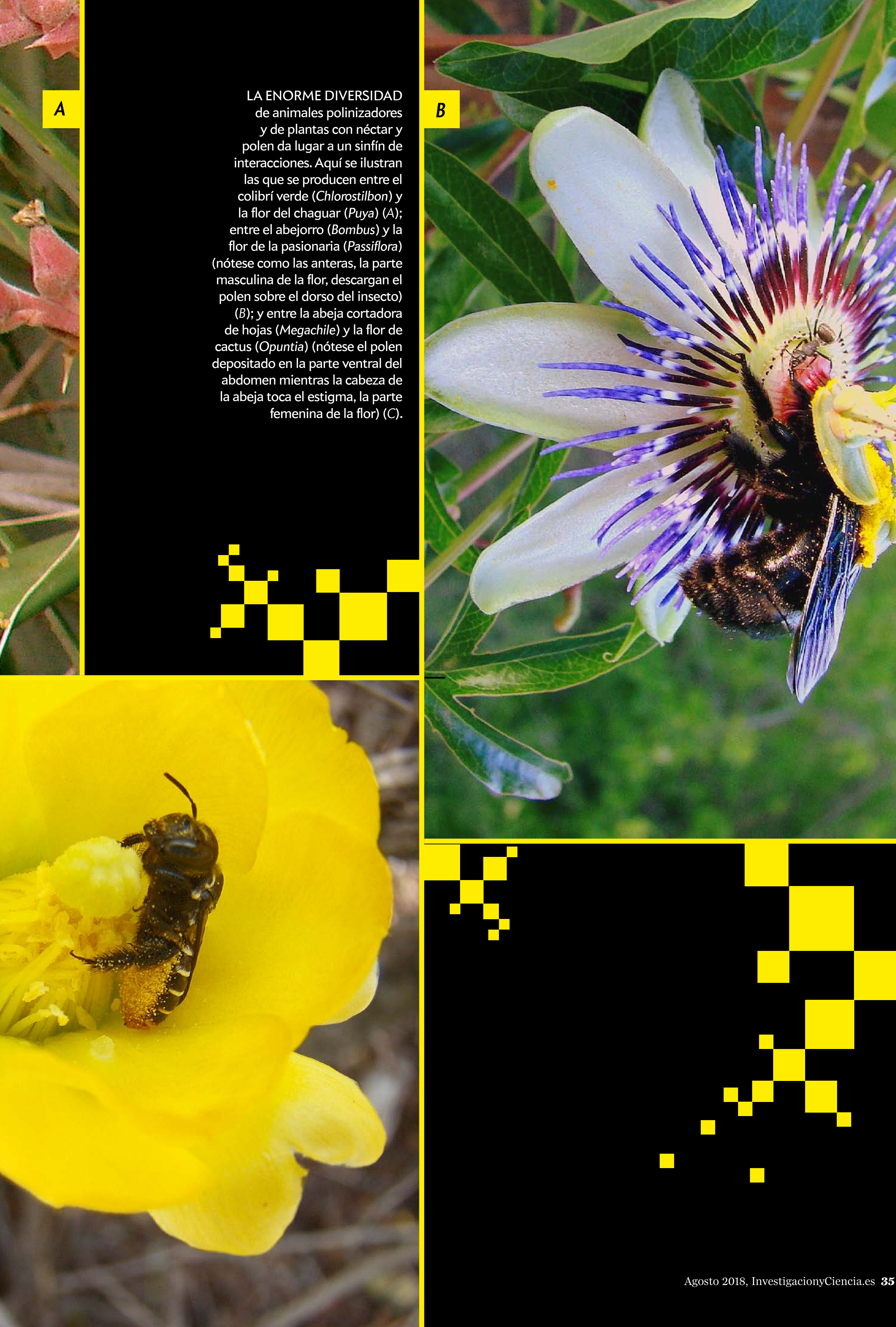
CONSERVACIÓN

EL VALOR DE LOS POLINIZADORES

Los animales que polinizan las plantas ejercen un papel fundamental en la producción de alimentos. Ante las amenazas que sufren, un informe reciente ha propuesto una serie de medidas para conservarlos

Leonardo Galetto, Lucas A. Garibaldi y Marcelo A. Aizen



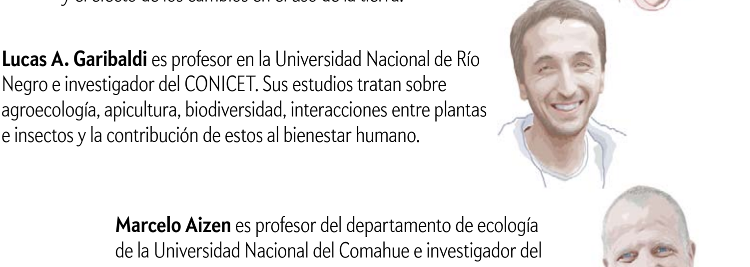


LA ENORME DIVERSIDAD de animales polinizadores y de plantas con néctar y polen da lugar a un sinfín de interacciones. Aquí se ilustran las que se producen entre el colibrí verde (*Chlorostilbon*) y la flor del chaguar (*Puya*) (*A*); entre el abejorro (*Bombus*) y la flor de la pasionaria (*Passiflora*) (nótese como las anteras, la parte masculina de la flor, descargan el polen sobre el dorso del insecto) (*B*); y entre la abeja cortadora de hojas (*Megachile*) y la flor de cactus (*Opuntia*) (nótese el polen depositado en la parte ventral del abdomen mientras la cabeza de la abeja toca el estigma, la parte femenina de la flor) (*C*).

Leonardo Galetto enseña biodiversidad en la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, e investiga en el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Se interesa por las interacciones entre polinizadores, plantas nativas y cultivadas y el efecto de los cambios en el uso de la tierra.

Lucas A. Garibaldi es profesor en la Universidad Nacional de Río Negro e investigador del CONICET. Sus estudios tratan sobre agroecología, apicultura, biodiversidad, interacciones entre plantas e insectos y la contribución de estos al bienestar humano.

Marcelo Aizen es profesor del departamento de ecología de la Universidad Nacional del Comahue e investigador del CONICET. Estudia la ecología reproductiva de las plantas y la influencia de la agricultura en el declive de los polinizadores.



¿Cómo valoramos los humanos lo que nos rodea?

Seguramente empleamos criterios muy distintos a la hora de jerarquizar lo que consideramos valioso e importante. En lo que quizá coincidiríamos es en que, para poder valorar algo o a alguien, lo primero que necesitamos es conocerlo lo mejor posible. El filósofo y biólogo Jean Piaget propuso que «no conocemos lo que vemos, sino que vemos lo que conocemos». A lo que podríamos añadir, como consecuencia lógica, que solo podemos valorar lo que conocemos.

Solemos otorgar un escaso valor a los polinizadores, aquellos animales que visitan las flores y transfieren el polen de una flor a otra. Pensamos poco en su enorme contribución a la producción agrícola mundial. Algunos son conocidos porque son carismáticos o tienen un valor estético, más que por su papel en la polinización. Es el caso de los colibríes o las mariposas de colores brillantes. Otros son notorios por lo que producen, como la abeja de la miel. Sin embargo, la mayoría de nosotros desconocemos las miles de especies que actúan como polinizadores o su relevancia en la polinización y, como consecuencia, en el bienestar humano. Nos resulta difícil valorar su tremenda importancia y, menos aún, tener en cuenta las amenazas que les provocamos con nuestras prácticas en su hábitat.

En 2016, la Plataforma Intergubernamental sobre Biodiversidad y Servicios de los Ecosistemas (IPBES), del Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente, elaboró un informe en el que participamos científicos especialistas en polinización de todos los continentes y en el que resumimos el conocimiento disponible sobre los polinizadores, la polinización y la producción de comida. Analizamos una gran cantidad de datos procedentes de cerca de 3000 publicaciones científicas, por lo que representa el estado actual de nuestro conocimiento sobre este tema.

En las siguientes páginas resumimos las principales cuestiones que se abordaron y debatieron, en particular: ¿cómo influyen los polinizadores en el bienestar humano? ¿Cuáles son las amenazas a las que hacen frente? ¿Qué podemos hacer para conservarlos? Se concluyó que los polinizadores, a pesar de ser económica y socialmente relevantes, están cada vez más amenazados por las actividades humanas, las cuales provocan un descenso en su abundancia y diversidad. Sin embargo, se describió una amplia gama de opciones de gestión y respuesta para detener su declive.

LA POLINIZACIÓN

La polinización mediada por los animales (además de la mediada por el viento o el agua) tiene lugar en la mayoría de las regiones del planeta, incluso en aquellas de climas extremos, como el Ártico o las zonas de alta montaña. Involucra a más de 200.000 especies de plantas con flores, las cuales interactúan con miles de especies de distintos grupos animales, principalmente insectos (como abejas, avispas, mariposas, polillas, dípteros o escarabajos), pero también aves, murciélagos y otros mamíferos. (También existen plantas sin flores, como los pinos o los helechos, si bien estas no interactúan con los animales polini-

EN SÍNTESIS

Los polinizadores son esenciales no solo para la reproducción de la mayoría de las plantas, sino también para la producción de alimento y otros bienes para los seres humanos. Sin embargo, la mayoría de las personas desconoce su papel en la polinización y el posterior desarrollo de frutos y semillas.

Los datos de muchas partes del mundo indican que los polinizadores están desapareciendo debido a la destrucción de sus ambientes naturales, el uso no controlado de productos agroquímicos y la transmisión de patógenos transportados por abejas introducidas con fines comerciales.

Algunas alternativas en la gestión agrícola pueden fomentar un conjunto diverso de polinizadores que favorecen la reproducción de las plantas y repercuten en la producción de numerosos alimentos que consumimos diariamente, así como en una serie de servicios ecosistémicos.



UNA ABEJA CARGADA DE POLEN, que acumula en las escopas de sus patas traseras, se aproxima a la planta *Solanum*. En la flor se observan las anteras amarillas (verticilo masculino), con poros en el extremo, y el estigma verdoso (verticilo femenino) (*A*). La abeja hace vibrar a las primeras para extraer el polen por el poro, a la vez que toca el estigma de la flor donde depositará el polen que transporta en su cuerpo (*B*).

zadores y, en comparación con la gran diversidad de plantas con flores, resultan muy escasas.) Pero aunque veamos animales posarse sobre las flores, necesitaremos mucha atención, conocimientos y un poco de ayuda tecnológica para constatar a nivel celular la relación entre la polinización con la reproducción de las plantas [*véase* «Control molecular de la polinización», por Ariel Goldraij; Investigación y Ciencia, abril de 2014].

Cuando visitan las flores, los animales buscan alimento, en forma de néctar, aceites y polen, para sí mismos o para su progenie. Con ello facilitan que la parte femenina de las flores (el ovario, con el estilo y el estigma en su extremo) reciba los pequeños granos de polen que se producen en las anteras, en el extremo de los estambres (la parte masculina). El polen contiene los gametos masculinos, que son transportados por el tubo polínico hasta el ovario, donde uno de ellos se unirá con el gameto femenino, etapa conocida como fecundación. Luego se iniciará el desarrollo de los frutos y las semillas en la denominada etapa de la fructificación.

El 80 por ciento de las especies de plantas con flores depende, en alguna medida, de animales polinizadores para su reproducción, por lo que si ellos desaparecieran se produciría un colapso en la biodiversidad y unas consecuencias muy problemáticas para el ambiente y el sustento de la humanidad.

En contrapartida, las flores ofrecen alimentos fundamentales y materiales de nidificación a miles de especies animales. Si no existiera una variedad de flores suficiente, dejarían de nutrirse adecuadamente y no podrían sobrevivir. Las flores ofrecen una variedad de nutrientes en el néctar y en el polen que los animales recolectan. El néctar, además de ser una fuente de agua y azúcares de gran valor energético, también contiene aminoácidos, iones minerales y proteínas, entre otros componentes nutricionales esenciales. Se ha comprobado que los colibríes sobreviven muy poco tiempo si no consiguen fuentes de néctar para alimentarse.

En la polinización se conjugan numerosos caracteres de los dos organismos implicados. En las flores, diversos aspectos estructurales, fisiológicos y funcionales intervienen en la atracción de los polinizadores y dan lugar a la gran variedad de interacciones que observamos en la naturaleza. Caracteres como el tamaño, la variedad de colores o perfumes de las flores, la cantidad de néctar que producen, así como el momento del día y la velocidad en que lo hacen, el tiempo que vive la flor o el número de flores que se abren cada día en cada planta, entre muchos otros aspectos, dan una idea del amplísimo espectro de posibilidades del que disponen las plantas para crear distintas estrategias de interacción con los animales polinizadores.

Por su parte, los animales han desarrollado diversas capacidades sensoriales, conductas y estructuras corporales que optimizan su alimentación y que, indirectamente, favorecen la transferencia del polen entre las plantas. De este modo, las abejas perciben una parte del espectro que los humanos no vemos, como la radiación ultravioleta, por lo que muchas flores reflejan ese color para informar de la existencia de una fuente de alimentos para los insectos [*véase* «Las flores, como las ve una abeja», por Aline Raynal-Roques y Albert Roguenant; Investigación y Ciencia, julio de 2018]. Asimismo, los insectos presentan



EL TAMAÑO CORPORAL y la longitud del aparato bucal varían notablemente entre estas pocas especies de abejas neotropicales, que están adaptadas para polinizar diversas plantas, dependiendo del tamaño y la morfología de la flor y de las características de sus órganos reproductores. De arriba abajo y de izquierda a derecha: *Nannotrigona*, *Ceratina*, *Coelioxys*, *Megalopta*, *Megachile*, *Apis*, *Euglossa* y *Bombus*.

T. MALHMANN

una gran variedad en la longitud del aparato bucal, del que se sirven para extraer el alimento de las flores: en diferentes grupos, mide de unos pocos milímetros a más de 20 centímetros. Ello se traduce en una interdependencia de distinto grado entre las plantas y los animales. Se trata de interacciones que se han desarrollado y mantenido a lo largo de la evolución impulsadas por factores del entorno, como la presencia de depredadores de los polinizadores y de herbívoros, las condiciones climáticas cambiantes, las enfermedades o las relaciones ecológicas con otras especies de plantas y animales de la comunidad.

¿QUÉ NOS OFRECEN?

Los polinizadores desempeñan un papel muy importante en nuestro bienestar, puesto que contribuyen a una buena alimentación y salud y nos ofrecen un entorno ambiental agradable. En el documento del IPBES resumimos el conocimiento disponible sobre su función en la producción de comida, además de otros importantes servicios tanto para los humanos como para los ecosistemas.

Hemos estimado así que el 75 por ciento de nuestros cultivos alimentarios y casi el 90 por ciento de las plantas con flores silvestres dependen de algún modo de la polinización animal. En general, los cultivos polinizados por animales contribuyen a un tercio de la producción agrícola mundial. Pero debido a que el grado de dependencia entre el rendimiento vegetal y los polinizadores varía mucho entre los cultivos, estos son responsables, de manera directa (es decir, en la producción de semillas y frutas que consumimos), de una fracción relativamente menor: entre el 5 y el 8 por ciento de la producción agrícola global. Sin embargo, los polinizadores también contribuyen a la producción de numerosas semillas que no son de consumo directo, como alimentos para animales o fibras.

Semillas como el café, el cacao, los porotos (judías), las habas o las almendras; frutas como las manzanas, las peras, los duraznos (melocotones), los melones, las sandías, las frutillas (fresones) o las cerezas; y verduras como los tomates, las berenjenas, los zapallos (calabazas) o los pimientos no podrían producirse sin los polinizadores en las cantidades en que las necesitamos para tener una dieta equilibrada.

Esos cultivos, algunos de gran valor económico, como el cacao, las almendras y el café, proporcionan empleo e ingresos a millones de personas, lo cual resulta de especial importancia para las comunidades rurales más pobres del mundo, que dependen de la agricultura para su subsistencia. En un estudio publicado en 2016 en *Science* demostramos que las explotaciones agrícolas de distintos tamaños en África, Asia y Latinoamérica se benefician de una elevada densidad y diversidad de polinizadores.

Cabe destacar que algunos cultivos producen frutos y semillas gracias a la intervención de polinizadores que manejamos los humanos, como la abeja de la miel, los abejorros o ciertas especies de abejas solitarias. Sin embargo, muchos otros cultivos no pueden ser polinizados adecuadamente por estos insectos y necesitan la participación de otros animales específicos. Por citar solo algunos ejemplos, la producción de frutos en cultivos de maracuyá en Brasil o de las especies hermanas de *Passiflora* (conocidas popularmente como pasionarias), la castaña de Pará (coquito de Brasil), ajíes (pimientos) y otras especies mucho más comunes, como la alfafa, deben ser polinizadas por abejas grandes, ya que las de la miel no tocan las piezas fértiles de la flor cuando buscan el néctar y, por lo tanto, no transfieren el polen de las anteras a la parte femenina de la flor. Otros cultivos, como los zapallos, los melones o las sandías, producen flores masculinas o femeninas y polen de gran tamaño que no es transportado por el viento, por lo que los polinizadores desempeñan un papel fundamental al mediar en la producción de estos frutos que consumimos.

Asimismo, los cultivos dependientes de los polinizadores constituyen la principal fuente de numerosos micronutrientes esenciales para la salud humana, entre ellos las vitaminas A y C, el calcio, el flúor y el ácido fólico. Y, además, nos aportan medicamentos, fibras, materiales de construcción y biocombustibles, entre otros bienes. Los cultivos destinados a la obtención de biocombustibles, como la colza, el girasol y la soja, han aumentado enormemente su superficie en Europa en los últimos decenios.

Con estos pocos ejemplos queda más que claro que la conservación de los polinizadores y el bienestar de los humanos están íntimamente relacionados.

LAS AMENAZAS

Los humanos ocasionamos problemas en el entorno cuando lo modificamos y explotamos para obtener recursos. Cambiamos el uso de la tierra y deforestamos amplias regiones de nuestro planeta para introducir plantas cultivadas, alteramos el curso

EN ESTE CULTIVO DE GIRASOL situado en Córdoba, Argentina, no se han aplicado productos agroquímicos, como herbicidas, lo que permite la proliferación de la vegetación natural entre los girasoles. Además, se han mantenido franjas de plantas leñosas que delimitan los campos (*derecha*). Estas prácticas contribuyen a crear un paisaje amigable para los polinizadores y favorecen que aumenten su abundancia y diversidad. Dos abejas de la miel polinizan el capítulo floral (formado por diminutas flores) del girasol (*abajo*).



de los ríos, detonamos montañas enteras para obtener algunos minerales valiosos. Estos desarrollos implican acciones sobre el ambiente y muchas veces tienen consecuencias negativas que solo podemos percibir a medio o largo plazo.

En el documento del IPBES hicimos constar que para amplias regiones continentales de Europa y Norteamérica se registra una lenta y paulatina desaparición de las especies polinizadoras, así como una disminución de la abundancia de las poblaciones de varias de ellas. Tal tendencia parece estar extendiéndose a todo el planeta, aunque los datos de los que se dispone en los otros continentes son más escasos y locales. Se trata de una desaparición silenciosa que, como decíamos antes, no percibimos.

La agricultura intensiva convencional tal vez sea una de las principales amenazas para la conservación de los polinizadores, ya que implica la transformación creciente de áreas naturales en campos de monocultivos de grandes extensiones, con el uso creciente de productos agroquímicos, como los herbicidas y los insecticidas, en particular los neonicotinoides. Numerosos datos indican que tales prácticas provocan la pérdida de polinizadores y alteran el proceso de la polinización.

Como consecuencia, especies que tienen una gran importancia comercial a escala mundial, como el café, el cacao o la colza, se ven afectadas por la merma de polinizadores. En varias regiones de China, algunos cultivos, como las manzanas, las peras, las cerezas o los duraznos, que podrían ser polinizados por una amplia variedad de animales, incluso la abeja de la miel, actualmente deben ser polinizados por personas de manera manual porque los polinizadores van desapareciendo de los ambientes naturales.

Otro riesgo importante para la diversidad de polinizadores autóctonos es la cría y manejo, en los ambientes agrícolas, de algunos insectos, como la abeja de la miel o los abejorros, para aprovechar sus productos o servicios. El número de colonias de abejas de la miel en casi todo el mundo ha crecido en las últimas décadas, y también se ha intensificado el comercio de colonias de algunas especies de abejorros (*Bombus*) para la polinización del tomate, la berenjena o los ajíes, entre otros cultivos. La abeja de la miel y los abejorros pueden transmitir parásitos a las especies de polinizadores nativos, entre ellos *Nosema* y el ácaro varroa, que se los ha relacionado con el conocido síndrome de despoblamiento de las colmenas. Existen regiones, como el sur de Chile y Argentina, donde las disminuciones poblacionales de las especies nativas han sido drásticas y muy rápidas debido a la introducción de abejorros exóticos, como hemos descrito en un estudio recién publicado en *Journal of Applied Ecology*.

¿QUÉ PODEMOS HACER?

Algunas culturas han percibido y valorado los polinizadores desde hace milenios y por eso han sido capaces de gestionarlos. En

general, está bien documentado que las poblaciones indígenas o culturas locales realizan un manejo ambiental de manera holística, que obviamente incluye a los polinizadores. De este modo, distintos entornos, como granjas, jardines de las viviendas y ambientes naturales, se conceptualizan de manera integrada, lo cual se manifiesta a través de distintos rituales sobre la fertilidad de la tierra y criterios comunitarios que integran a los humanos con la biodiversidad y la gestión del ambiente.

Las prácticas basadas en el conocimiento indígena y local pueden ser una fuente de soluciones para los retos actuales, en conjunción con la ciencia, para fomentar la abundancia y la diversidad de polinizadores. En el informe del IBPES propusimos una serie de medidas que deberían tomar los Gobiernos y la población para conservarlos, disfrutarlos y valorarlos.

Una de las principales estrategias consiste en la protección de los ambientes naturales donde viven los polinizadores y la modificación de algunas prácticas agrícolas. Se ha demostrado que una mayor variedad de plantas y flores cerca de los cultivos se relaciona con la presencia de polinizadores más diversos, lo que a su vez aumenta la polinización de muchas especies cultivadas, incluso si existen en la proximidad colmenas de abejas melíferas. Dejar corredores con vegetación espontánea entre los campos de cultivo ayuda a mantener la diversidad de polinizadores en la región, ya que les permiten desplazarse para poder encontrar sitios de alimentación y nidificación durante todo el año. A la vez, las flores tienen un valor estético para nosotros que hacen agradables los ambientes públicos en los que desarrollamos muchas actividades.

Es necesario adquirir conocimiento sobre la diversidad de interacciones que crean los polinizadores en los ambientes naturales y en los agroecosistemas para poder implementar nuevas estrategias para la producción de alimentos saludables, como promover una gran diversidad de especies cultivadas en pequeños lotes, con muy baja o nula aplicación de productos agroquímicos. Cuando sea necesario aplicarlos, es preciso conocer cómo se acumulan en el ambiente y cómo impactan en diferentes grupos de organismos, en particular en los polinizadores, sus nidos y las generaciones siguientes, por citar solo algunos vacíos de conocimiento.

Es igual de importante difundir esta problemática y ofrecer información científica a los múltiples responsables. De esta forma, se podrán desarrollar los instrumentos sociopolíticos y legales que ayuden a los Gobiernos a aplicar incentivos a aquellos productores que opten por una agricultura sostenible, diversificada, menos tóxica y con mejor calidad nutricional para la población. Medidas tales como una mejor regulación y una reducción del uso de productos agroquímicos, el manejo integrado de las plagas, y los subsidios para los agricultores que diversifican su producción en pequeños lotes y amplían las áreas con vegetación natural para que sirvan de corredores biológicos, contribuirán a la conservación de los polinizadores y a alcanzar una producción de comida de mayor calidad.

En relación con lo anterior, hay quizá dos puntos fundamentales que deben ser debatidos por la sociedad. En primer lugar, si queremos conservar los polinizadores, será necesario planificar un mejor ordenamiento del territorio que contemple el desarrollo de las urbanizaciones y campos de cultivo integrados por corredores biológicos. En segundo lugar, es necesario reflexionar sobre la ética ambiental y la visión economicista y liberal de los ambientes naturales que predomina en nuestra cultura, en la que los criterios para desarrollar el uso de la tierra y las prácticas asociadas a la producción de alimentos están vinculados a la renta que producen y al cortoplacismo, sin importar tanto la diversidad y la calidad de los alimentos producidos, la contaminación o la conservación de la biodiversidad.

Asimismo, debemos pensar qué podemos hacer como consumidores. Podríamos cambiar nuestros hábitos y favorecer la adquisición de alimentos más saludables, o aprovechar pequeñas parcelas de nuestros jardines o balcones para cultivar vegetales y frutas. Si aumentamos el consumo de alimentos procedentes de la agricultura ecológica o disminuimos el de proteínas animales, indirectamente estaremos contribuyendo a la conservación de los polinizadores, ya que la producción de este tipo de alimentos promoverá las áreas de cultivo más diversificadas y menos contaminadas.

Los científicos constituimos un grupo más entre los distintos actores sociales. Nuestra función es aportar una visión con base científica como punto de partida para debatir sobre la mejor manera de manejar nuestro ambiente y los polinizadores. Nuestra perspectiva considera múltiples factores y escalas espaciotemporales y no está basada principalmente en la rentabilidad económica o en un interés cortoplacista. Se trata de un punto de vista más, entre otros, que los responsables tienen que evaluar. Una vez que la sociedad alcance la necesaria reflexión sobre los caminos disponibles que le conviene seguir, podremos decidir en conjunto las mejores opciones para nosotros mismos y para las futuras generaciones.

En la medida en que las sociedades reconozcamos que los polinizadores forman parte de nuestro sistema de producción de alimentos y de nuestro bienestar, será posible desarrollar una planificación adecuada del territorio, hacer un seguimiento a largo plazo de los polinizadores y la polinización, y financiar nuevas investigaciones en las que participe la población (que puede aportar sus observaciones de campo). Con ello conseguiremos mejorar el rendimiento y la calidad de los productos agrícolas, a la vez que protegeremos el ambiente y los polinizadores y conoceremos mejor sus funciones. IyC

PARA SABER MÁS

The assessment report of the Intergovernmental science-policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES) on pollinators, pollination and food production. Dirigido por S. Potts, V. Imperatriz Fonseca & H. Ngo. Secretariado de la Plataforma Intergubernamental sobre Biodiversidad y Servicios de los Ecosistemas, Bonn, Alemania, 2016.

Mutually beneficial pollinator diversity and crop yield outcomes in small and large farms. L. A. Garibaldi et al. en *Science*, vol. 351, págs. 338-391, 2016.

Ten policies for pollinators. L. V. Dicks et al. en *Science*, vol. 354, págs. 975-976, 2016.

Safeguarding pollinators and their values to human well-being. S. G. Potts et al. en *Nature*, vol. 540, págs. 220-229, 2016.

Coordinated species importation policies are needed to reduce serious invasions globally: The case of alien bumblebees in South America. M. A. Aizen et al. en *Journal of Applied Ecology*, 10.1111/1365-2664.13121, 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Redes mutualistas de especies. Pedro Jordano y Jordi Bascompte en *IyC*, septiembre de 2008.

Salvar la abeja melífera. Diana Cox-Foster y D. VanEngelsdorp en *IyC*, junio de 2009.

La silenciosa pandemia de las abejas. Aránzazu Meana et al. en *IyC*, octubre de 2009.

por Stefano Ambroso y Janire Salazar

Una selva animal bajo un desierto de hielo

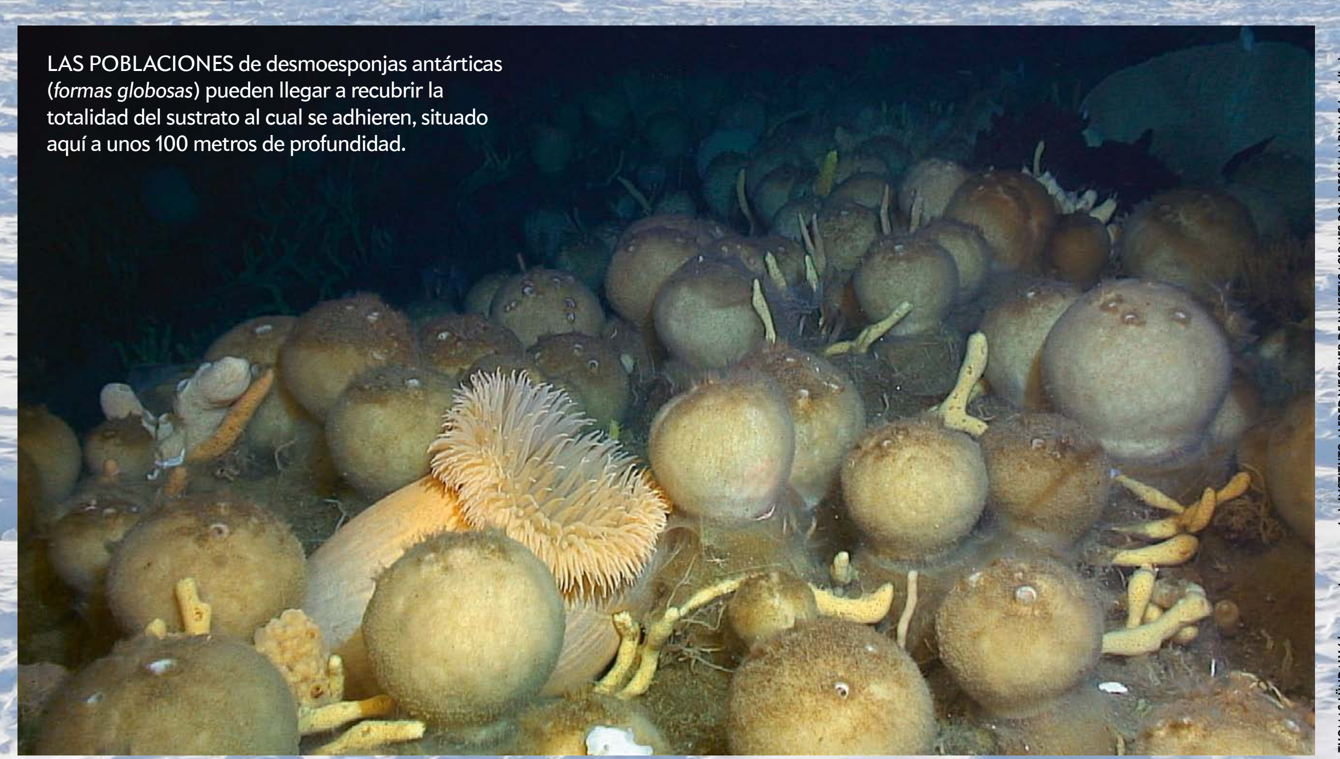
Los fondos marinos de la alta Antártida son los mejor conservados del planeta

Durante más de seis meses al año, los mares de Weddell y Ross, conocidos también como la alta Antártida, están recubiertos por una capa de hielo de más de un metro de espesor. En esta región, la temperatura de los fondos marinos, que alcanzan una profundidad de entre 50 y 500 metros, se ha mantenido estable durante cientos de miles de años. Allí se han descubierto comunidades marinas que presentan una de las más altas diversidades del planeta. Este excepcional paradigma de la diversidad biológica es aún hoy un aspecto que sorprende a los científicos y forma parte de una de las líneas de investigación más importantes del océano Antártico.

Comunidades dominadas por esponjas, gorgonias, ascidias y briozoos cubren por completo el lecho marino a lo largo de miles de kilómetros cuadrados. Tales formaciones han sido escasamente afectadas por las perturbaciones naturales desde hace millones de años y, debido a su inaccesibilidad, no han sufrido las consecuencias de las actividades humanas. Esas circunstancias han hecho de estos fondos los mejor conservados del planeta, lo que los convierte en un laboratorio ideal para conocer y entender la vida y los ecosistemas marinos en un ambiente inalterado.

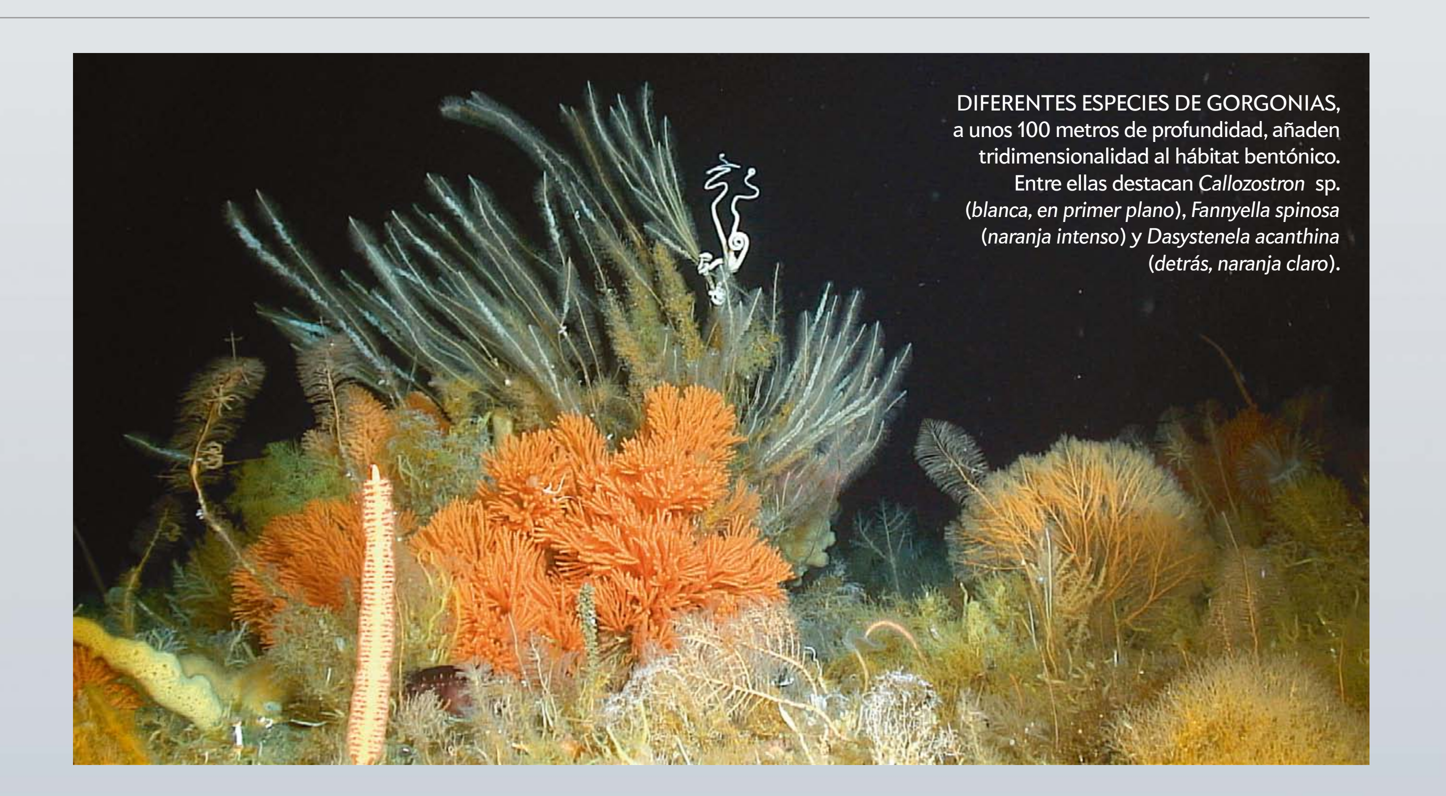
Los organismos de los fondos presentan características fisiológicas y ecológicas que les permiten vivir en condiciones extremas de baja temperatura y escasez de luz. La vida que crece dentro del hielo superficial es una de las claves para explicar este fenómeno. Allí proliferan millones de microalgas con un elevado poder nutritivo y que caen al fondo cada verano cuando el hielo se funde. De esta manera, a las comunidades mejor preservadas del planeta no les ha faltado nunca el mejor alimento posible y han evolucionado lentamente para llegar a desarrollar una elevada biodiversidad, que se ha descubierto hace tan solo unos pocos años gracias a los trabajos realizados por nuestro grupo.

—Stefano Ambroso
—Janire Salazar
Dpto. Biología Marina y Oceanografía
Instituto de Ciencias del Mar,
Barcelona



LAS POBLACIONES de desmoesponjas antárticas (*formas globosas*) pueden llegar a recubrir la totalidad del sustrato al cual se adhieren, situado aquí a unos 100 metros de profundidad.

THOMAS LÜNDALV (*desmosponjas y gorgonias*), INSTITUTO ALFRED WEGENER DE INVESTIGACIONES POLARES Y MARINAS (*ascidias*), STEFANO AMBROSO (*imagen de fondo*)



DIFERENTES ESPECIES DE GORGONIAS, a unos 100 metros de profundidad, añaden tridimensionalidad al hábitat bentónico. Entre ellas destacan *Callozostron* sp. (*blanca, en primer plano*), *Fannyella spinosa* (*naranja intenso*) y *Dasystenela acanthina* (*detrás, naranja claro*).

LA RIQUEZA NATURAL del fondo marino de la Antártida se debe a la fertilidad de los hielos, dentro de los cuales se encuentra una infinidad de microalgas que representan el primer eslabón de la cadena trófica antártica (*imagen de fondo*).



FONDOS a 400 metros de profundidad dominados por ascidias (*naranja claro*).

por Patricia Fara



Patricia Fara es presidenta de la Sociedad Británica de Historia de la Ciencia.

Guerra, mujeres y ciencia

Lecciones del pasado para mejorar el futuro: la labor científica de las mujeres durante la Primera Guerra Mundial

Las estadísticas son claras: un número desproporcionadamente bajo de mujeres alcanza los cargos más altos en ciencia, tecnología, ingeniería, matemáticas y medicina (STEMM, por sus siglas en inglés) y, en general, gana menos que los hombres. Como historiadora licenciada en física, mi ambición es explorar cómo el pasado ha llevado al presente, con el objetivo principal de mejorar el futuro. Los viejos prejuicios aún resuenan en la sociedad, y lo que sucedió hace un siglo sigue importando hoy.

Hace unos años descubrí un libro que recogía las actividades de unas 600 mujeres de la Universidad de Cambridge durante la Primera Guerra Mundial. Por primera vez, leí los nombres de mujeres doctoras que operaron en el frente, químicas que desarrollaron explosivos y gases tóxicos, biólogas que investigaron sobre enfermedades tropicales o preservación de vitaminas e ingenieras que llevaron a cabo cálculos balísticos. ¿Por qué, me preguntaba, estas mujeres tan extraordinarias habían sido olvidadas? ¿Podrían estas científicas pioneras arrojar luz sobre las actitudes modernas?

Durante casi medio siglo antes de la guerra, algunas mujeres excepcionalmente inteligentes, valientes y persistentes ya habían desafiado los convencionalismos para estudiar ciencias. Más tarde, cuando los hombres partieron al frente, las mujeres científicas se labraron oportunidades para servir a su país asumiendo puestos en museos, escuelas y departamentos gubernamentales. Aquellas que ya se dedicaban a la investigación cambiaron sus proyectos para centrarse en explosivos, fármacos, insecticidas, aleaciones, vidrio y diseño de aviones, al tiempo que las escuelas de medicina abrieron temporalmente sus puertas a las mujeres. Durante cuatro años, mujeres científicas, doctoras e ingenieras demostraron que podían realizar el trabajo de los hombres y, a menudo, hacerlo mejor.

Entre todas estas mujeres maravillosas, me identifiqué especialmente con dos: una química y otra médica. A continuación hablaremos de ellas, en representación de las innumerables colegas que lucharon para superar las barreras burocráticas y los prejuicios que, lamentablemente, siguen sin desaparecer del todo.

Martha Whiteley (1866–1956)

La farmacéutica Martha Whiteley asistió a una de las pocas escuelas de niñas que enseñaban ciencias y luego ganó becas para la Royal Holloway, una nueva universidad para mujeres. Después de graduarse, pasó once años trabajando en su doctorado mientras ejercía como docente.

Encontró un puesto de investigación en el Colegio Imperial de Londres, pero durante la guerra la institución parecía un campamento militar. Las habitaciones fueron requisadas como oficinas, los soldados dormían en los pasillos y las vitrinas de los museos servían como mesas de comedor. Con muchos hombres ausentes, veinte mujeres trabajaban en la Oficina de Dibujo del Ejército, dos técnicas desarrollaban insecticidas y —algo sin precedentes— había mujeres ejerciendo de profesoras de audiencias mixtas. Posponiendo su trabajo sobre barbitúricos, Whiteley dirigió un equipo de mujeres que investigaban gases venenosos en las trincheras experimentales que se excavaron en los jardines del centro.

Probaban los gases en su propio cuerpo, lo que les acarreó experiencias desagradables. Más de treinta años después, en una conferencia para estudiantes, Whiteley describió una de ellas: «Apliqué una pequeña muestra en mi brazo y durante casi tres meses sufrí una gran incomodidad por la herida abierta que causó en la parte interior del codo, de la que todavía conservo la cicatriz». Recibió varios tributos por su investigación durante la guerra, como dar su nombre a un explosivo (DW, por Dra. Whiteley) y ser aplaudida en la prensa como «la mujer que hace llorar a los alemanes» con gas lacrimógeno.

Whiteley fue una excelente maestra. Una estudiante recordaba que, tras la guerra, estaba «a cargo del laboratorio orgánico de los estudiantes universitarios. [...] Eran casi todos hombres y un grupo muy animado, principalmente excombatientes, pero ella los tenía completamente bajo control». También colaboró en una enciclopedia de química orgánica en cuatro volúmenes que se convirtió en un texto estándar. Y, al tiempo que construía su carrera, luchó para mejorar la posición de las mujeres en ciencia. Como Whiteley, hubo otras mujeres que dirigían proyectos de investigación, enseñaban en universidades, escribían libros de texto, asesoraban a la industria e inspeccionaban fábricas. Sin embargo, fueron excluidas de muchas sociedades científicas.

En 1920 Whiteley se convirtió en una de las primeras mujeres en unirse a la Sociedad Química de Londres. Pero este éxito llegó tras cuarenta años de constante agitación: una y otra vez, la votación iba en contra de ellas, influida por poderosos reaccionarios que sostenían que lo que debían hacer las mujeres químicas



SELLO SERBIO de 2015 emitido en honor a Isabel Emslie Hutton.

era criar a la siguiente generación. Debían mantenerse «alejadas de la tentación de ser absorbidas por su trabajo, por miedo a sacrificar su feminidad; deberían ser consideradas como personas elegidas, por estar destinadas a ser las madres de los brillantes químicos del futuro».

No fue hasta 1945 cuando las dos primeras mujeres ingresaron en la Real Sociedad de Londres. Los que se oponían insistían condescendientemente en que «hay una chispa creativa en el hombre que está ausente en las mujeres, aunque estas últimas realizan a menudo un trabajo maravillosamente concienzudo y minucioso una vez encendida la chispa». Nadie hoy se atrevería a admitir que comparte ese sentimiento, pero ¿tal vez existe aún?

Isabel Emslie (1887-1960)

En 1914, el Ejército británico fue inflexible: las mujeres doctoras debían quedarse para llenar las vacantes creadas por los hombres. «No creo que estar en el frente o cerca de este sea lugar para ellas», declaró un oficial. Pero las mujeres tomaron la iniciativa y establecieron unidades hospitalarias en toda Europa. Viviendo y muriendo al borde del peligro, estas doctoras tuvieron un impacto enorme en las zonas de guerra y en la población local. Además de tratar a los soldados heridos, administraron unidades de maternidad, se ocuparon de los refugiados, investigaron sobre enfermedades infecciosas e introdujeron programas de salud preventiva.

Ya de niña, Isabel Emslie tenía claro que quería ser doctora. Aunque en Edimburgo, su ciudad natal, había más plazas de formación para mujeres que en Londres, sabía que tras la graduación los hombres tenían garantizados empleos de por vida, mientras que ella probablemente sería destinada como misionera en el extranjero. Después de algunos años marginada en hospitales psiquiátricos escoceses, vio que la guerra le ofrecía la oportunidad de practicar la cirugía, especialidad dominada por hombres. Hacia finales de 1915 partió hacia Europa del Este.

Durante más de cinco años, Emslie trabajó en condiciones espantosas. Los pacientes se apiñaban en palés de paja sucia y los cirujanos operaban a la luz de las velas sin desinfectante ni anestésicos. En invierno, la congelación y la gangrena se sumaban a las complicaciones de la disentería y otras enfermedades, mientras que en los calurosos veranos abundaban el cólera, la malaria y el tifus. Después de un par de años, Emslie se postuló con éxito para dirigir un hospital financiado por donaciones estadounidenses. «¡Tan joven y ya directora!», escribió con orgullo a su madre. «Debería tener veinte años más y llevar botas claveteadas y franela.»

Pronto Emslie lideraría un convoy de nueve vehículos para establecer un hospital tras la línea de frente. Todas las mujeres que lo componían habían presenciado la devastación y la miseria, pero nada podía compararse con lo que iban a encontrarse entonces. El quinto día, en remolinos de nieve, el hedor les anunció que habían llegado. Cientos de soldados yacían moribundos en el suelo, todavía con sus uniformes, plagados de gusanos y piojos. Los pacientes lloraban continuamente mientras los cirujanos operaban sin anestesia en una mesa de caballete. Emslie nunca olvidó «el suelo empapado en sangre, [...] los cubos abarrotados de brazos y piernas negros de moscas».

En enero de 1919 Emslie había creado un hospital bien equipado, con un departamento de rayos X, un laboratorio y un dispensario, que un equipo de antiguos pacientes agradecidos mantenía inmaculado. Su equipo mejoró la vida de los serbios locales al solucionar problemas crónicos; algunos congénitos, otros fruto de accidentes o negligencia. El 90 por ciento de los niños que trataron tenían glándulas tuberculosas en el cuello.

Finalmente Emslie regresó a casa, pero había disfrutado de la independencia de un hombre y lamentó reanudar los roles femeninos tradicionales. A pesar de sus facultades quirúrgicas, tomó un trabajo rutinario en el hospital. Pero, al igual que las maestras y las funcionarias, se vio obligada a renunciar a él después de casarse. Pasó el resto de su carrera en una sucesión de puestos médicos voluntarios y escribiendo libros de información sobre la salud de la mujer. «Las que habíamos tomado parte en la guerra tratamos de crear una nueva vida para nosotras mismas», recordaba. «Y algunas, como yo, lo encontramos una tarea ardua.»

La ciencia después de la guerra

Tras la guerra, los hombres que regresaron del frente reclamaron sus antiguos trabajos. Resurgieron estereotipos y prejuicios, pero las mujeres habían demostrado ser capaces de realizar trabajos tradicionalmente reservados a los hombres. Ese sentimiento sin precedentes de logro, poder y posibilidad ya no podía ser borrado.

Aun así, para una mujer, ser una buena científica no era suficiente. Un orientador profesional lo dijo explícitamente: «Cuando se trata de un puesto permanente, para tener las mismas oportunidades que un rival masculino, la mujer obviamente debe ser un poco mejor». El desempleo nacional era alto y los puestos más atractivos eran para los hombres. Una química desilusionada protestó así: «Los graduados varones [...] reciben un salario razonable y, por muy jóvenes que sean, si sus calificaciones universitarias son buenas, generalmente obtienen una posición bastante digna desde el principio. La chica que trabajó codo a codo con ellos en la universidad, en cambio, es dura y constantemente humillada».

La legislación actual protege supuestamente la igualdad de oportunidades, pero los prejuicios ocultos sobreviven. Los científicos de hoy muestran formas sutiles que hacen sentir intrusas a las mujeres: la ausencia de retratos femeninos en las paredes de los pasillos, la escasez de trabajos de mujeres en las listas de lectura de los estudiantes, la casi inexistencia de mujeres mayores que imparten conferencias. Antes de la Primera Guerra Mundial, las activistas podían ver aquello por lo que estaban luchando. La discriminación moderna, en cambio, es elusiva, insidiosa y obstinadamente difícil de erradicar.

PARA SABER MÁS

Memories of a doctor in war and peace. Isabel Emslie Hutton. Heinemann, 1960.
No distinction of sex? Women in British universities, 1870-1939. Carol Dyhouse. UCL Press, 1995.
Chemistry was their life: Pioneer British women chemists, 1880-1949. Marelene F. Rayner-Canham y Geoffrey Rayner-Canham. Imperial College Press, 2008.
Fighting on the home front: The legacy of women in World War One. Kate Adie. Hodder, 2013.
Women in the war zone: Hospital service in the First World War. Anne Powell. The History Press, 2013.
A lab of one's own: Science and suffrage in the First World War. Patricia Fara. Oxford University Press, 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

La polémica de los sexos en la historia de la ciencia. Monserrat Cabré en *IyC*, octubre de 2014.
Las mujeres en la ciencia de hoy. Esther Rubio Herráez en *IyC*, diciembre de 2014.
Mujeres y ciencia en la España de la Ilustración. Elena Serrano en *IyC*, abril de 2015.
La ciencia tiene un problema de género. Hannah A. Valantine en *IyC*, abril de 2017.
Las jóvenes científicas del «Rockefeller» (1931-1939). Carmen Magallón en *IyC*, junio de 2018.

por Anxo Sánchez

Anxo Sánchez es catedrático de matemática aplicada en la Universidad Carlos III de Madrid y director de la Unidad Mixta Interdisciplinar de Comportamiento y Complejidad Social, de las universidades Carlos III, de Valencia y de Zaragoza. Su investigación se centra en las aplicaciones de la física a otras disciplinas, sobre todo a las ciencias sociales.



Retos del nuevo Ministerio de Ciencia

Unas pocas acciones prioritarias tendrían una enorme repercusión para los científicos y para la sociedad

El Gobierno surgido de la moción de censura aprobada en el Congreso de los Diputados el pasado 1 de junio ha recuperado el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y ha designando como titular al astronauta Pedro Duque. Es, en principio, una gran noticia para la comunidad investigadora española, pero el entusiasmo inicial tiene que traducirse en acciones concretas. Estas vendrán limitadas por la duración del nuevo Gobierno, unos dieciocho meses como máximo, por su exigua minoría en el Congreso, y por la existencia de un presupuesto para 2018 ya aprobado y con escaso interés en promover la ciencia. Aun así, hay aspectos que el nuevo ministerio puede y debe abordar con la máxima celeridad y atención. Expongo a continuación los que considero más apremiantes.

Potenciar la Agencia Estatal de Investigación (AEI). La Ley de la Ciencia, aprobada por un amplio consenso en 2011, establecía que la AEI se encargaría de fomentar la generación de conocimiento en todas las áreas del saber. Pese a los plazos marcados por la ley, el Gobierno salido de las elecciones de ese año no la creó hasta 2015 y, cuando lo hizo, no respetó el espíritu de independencia ni su gestión por parte de científicos, según disponía la ley. Así, hoy la AEI no es más que la antigua Dirección General de Investigación Científica y Técnica, en el Ministerio de Economía y Competitividad, lo cual le impide desarrollar todas sus misiones. Es, pues, imprescindible potenciar la agencia mediante su transformación en un organismo independiente y con una gobernanza similar a la del Consejo Europeo de Investigación (ERC). Una AEI dirigida y gestionada por científicos tendría capacidad de administrar los recursos, definir las políticas de estímulo y apoyo a la investigación y diseñar los planes plurianuales de actuación. Hay que decir que, desde su creación, la AEI está en contacto con el ERC para aprender de sus buenas prácticas, por lo que el paso más importante que tendría que dar el nuevo ministerio es sacarla de su organigrama.

Facilitar las gestiones burocráticas. El trabajo de los investigadores en España se ve comprometido, además de por la falta de recursos, por la burocracia. Este problema tiene dos vertientes que son abordables por el nuevo Ministerio. Una es la extraordinaria fiscalización que ejerce el ministerio de Hacienda sobre el dinero de la investigación, incluso sobre el que no viene del Estado español. Esto ha llevado a centros de investigación de gran prestigio al borde del cierre y a investigadores de muy alto nivel y con gran poder de captación de recursos a irse al extranjero. También ha provocado la desesperación de la comunidad científica, que ve cómo se le revisan gastos de cuantía ridícula, con el consiguiente derroche de tiempo de los investigadores y del personal de administración. Arreglar esta situación no debería suponer más que una simple conversación con el Ministerio de Hacienda que condujera a un régimen ya no especial, sino del mismo rigor y no superior al de las otras instituciones.



Por otro lado, la burocracia también es un problema a la hora de solicitar proyectos y recursos. Desde que la ciencia española empezó a levantar cabeza en la década de los ochenta, las convocatorias competitivas tienen calendarios erráticos: aparecen en verano o Navidades y cuentan con solo dos semanas de plazo; hay años que no se anuncian, o se convocan becas para formación predoctoral meses después de que los posibles candidatos hayan acabado sus estudios. De nuevo, la referencia es Europa, donde dentro de sus programas marco de investigación las convocatorias se hacen con una anticipación de meses y para un período de dos años, con plazos razonables para preparar las solicitudes. Lo único que habría que hacer es que la AEI publicara un plan de trabajo y anunciara todas sus convocatorias del mismo modo, a poder ser en coordinación con los Gobiernos autónomos. La guinda de pastel sería conocer de antemano el presupuesto para varios años.

Promocionar el conocimiento de la ciencia entre la población es otra importante labor que el nuevo ministerio tiene que ejercer. Estamos en un momento especialmente peligroso, en el que se divulgan ideas basadas en todo tipo de falsedades e intereses creados. Hallamos ejemplos en los movimientos antivacunas, un problema muy serio para la salud pública que puede llevar al rebrote de algunas enfermedades, como está ocurriendo en Italia con el sarampión. Las falsas medicinas o terapias, como la homeopatía o el reiki, repetidamente desmentidas por la ciencia, siguen también en aumento. Es, pues, importante transmitir a toda la población cómo funciona la ciencia para que pueda tener juicio crítico en estas y otras muchas cuestiones.

Se podrían apuntar otras actuaciones, pero estas son quizá las más prioritarias y las que más rápidamente podrían tener un gran efecto sobre la comunidad científica y sobre la sociedad. Esperemos que el nuevo ministerio pueda abordarlas y tenga un éxito del mismo calibre que la ilusión que ha despertado. IyC



LAS GRANDES PREGUNTAS DE LA CIENCIA

PRODUCIDO CON LA COLABORACIÓN DEL PREMIO KAVLI

SUMARIO

Mirar hacia las estrellas



«TODOS VIVIMOS EN EL FANGO, PERO algunos miramos hacia las estrellas», escribió Oscar Wilde. Desde que el primer humano se sentara junto a los rescoldos del fuego en una noche de invierno, mientras otros dormían y el campamento se quedaba en silencio, nuestra especie ha reflexionado sobre los misterios de la existencia. ¿Qué son esos puntos de luz que salpican el cielo? ¿Qué es lo que se mueve en mi vientre? ¿De dónde ha surgido esta vida? ¿Qué es la vida? ¿Cómo protegeré a este ser de todo peligro?

Tales preguntas no solo han ocupado a las personas corrientes, sino también a los filósofos y, más tarde, a los científicos. En los últimos siglos, es tanto y tan maravilloso todo lo que hemos aprendido que, en ocasiones, puede parecer que ya no quedan rincones por explorar ni milagros que descifrar. Sin embargo, la realidad es que cada nuevo hallazgo conduce a preguntas más profundas. Sabemos lo que son las estrellas, pero sus movimientos nos resultan inexplicables. Podemos mirar en los recovecos más alejados del universo, pero solo para aumentar nuestra sospecha de que nunca seremos capaces de entenderlo todo. Hemos comenzado a comprender cómo funciona nuestro cuerpo, pero la mente se sigue mostrando esquiva. Sabemos qué es la vida, pero no de dónde surgió esa primera chispa. Podemos observar objetos inconcebiblemente diminutos, pero, cuanto más tratamos de controlarlos, más fuera de nuestro alcance parecen estar.

Este informe sobre las mayores preguntas de la ciencia ha sido elaborado por *Scientific American* y *Nature* con el patrocinio del Premio Kavli. Más allá de la financiación, el Premio Kavli no ha contribuido en modo alguno al contenido de los artículos, los cuales son responsabilidad exclusiva de los autores y editores que han participado en el proyecto.

—Madhusree Mukerjee

PORTADA E ILUSTRACIONES PRINCIPALES DE CHRIS GASH



GRAVEDAD CUÁNTICA

¿Qué es el espaciotiempo?

A las escalas más pequeñas, el espacio podría emerger a partir de cuantos. ¿Cómo podrían ser esos componentes básicos?

George Musser

LAS PERSONAS SIEMPRE HEMOS SUBESTIMADO EL ESPACIO. A fin de cuentas, no es más que vacío; un telón de fondo para todo lo demás. De igual modo, el tiempo simplemente transcurre sin cesar. Pero, si los físicos han aprendido algo en el arduo camino hacia la unificación de sus teorías, es que el espacio y el tiempo conforman un sistema de una complejidad tan asombrosa que puede desafiar los más fervientes esfuerzos por entenderlo.

Albert Einstein lo vio en noviembre de 1916. Un año antes había formulado su teoría de la relatividad general, la cual dicta que la gravedad, en lugar de ser una fuerza que se propaga a través del espacio, constituye una característica del espaciotiempo en sí. Cuando lanzamos una pelota al aire, cae al suelo porque la Tierra distorsiona el espaciotiempo circundante de tal modo que las trayectorias de la pelota y el suelo vuelven a cruzarse. En una carta a un amigo, Einstein consideró unir la relatividad general con la entonces incipiente mecánica cuántica. Eso no solo distorsionaría el espacio, sino que lo desmantelaría. Einstein apenas sabía por dónde empezar: «¡Cuánto me he atormentado ya de esta manera!», escribió.

El físico nunca llegó demasiado lejos en ese empeño. Incluso hoy existen diferentes propuestas para formular una teoría cuántica de la gravedad. Sin embargo, las disputas al respecto eclipsan una importante verdad: todos los planteamientos implican que el espaciotiempo se deriva de algo más profundo, una idea que rompe con 2500 años de pensamiento científico y filosófico.

CAER EN UN AGUJERO NEGRO

UN IMÁN DE COCINA muestra el problema: puede sujetar un clip contra la gravedad ejercida por toda la Tierra. La gravedad es mucho menos intensa que el magnetismo o que las fuerzas eléctricas o nucleares, de modo que, cualesquiera que sean sus efectos cuánticos, resultarán aún más débiles.

Así las cosas, el mejor banco de pruebas para estudiar la gravedad cuántica lo aportan los agujeros negros. «Son lo más parecido que tenemos a un experimento», apunta Ted Jacobson, de la Universidad de Maryland. Estos objetos sirven como atalayas teóricas: ¿qué ocurre cuando tomamos ecuaciones que funcionan a la perfección en condiciones de laboratorio y las extrapolamos a la situación más extrema que podemos concebir? ¿Revelará ello algún problema sutil?

La relatividad general predice que la materia que caiga en un agujero negro se comprimirá sin límite a medida que se aproxime al punto central; un callejón sin salida llamado «singularidad». No es posible extrapolar la trayectoria de un objeto más allá de la singularidad, ya que su línea de tiempo termina allí. Incluso hablar de «allí» resulta problemático, ya que el propio espaciotiempo deja de existir. Los investigadores esperan que una teoría cuántica de la gravedad actúe como un «microscopio» que permita resolver ese punto y estudiar qué sucede con la materia que cae.

Fuera, en el borde del agujero negro, la gravedad es más débil, por lo que las leyes conocidas deberían seguir siendo válidas. Por eso resulta aún más desconcertante que no lo sean. Un agujero negro se encuentra delimitado por un horizonte de sucesos, la superficie más allá de la cual nada puede escapar. La caída es irreversible. Y eso supone un problema, ya que todas las leyes fundamentales de la física, incluidas las cuánticas, son reversibles. Al menos en teoría, siempre es posible invertir el movimiento de las partículas y recuperar su estado inicial.

Los físicos se enfrentaron a un enigma similar a finales del siglo XIX, cuando consideraron las propiedades del cuerpo negro. El electromagnetismo de Maxwell predecía que este absorbería toda la radiación que incidiera sobre él, por lo que nunca alcanzaría el equilibrio con la materia circundante. «Absorbería una cantidad infinita de calor de una fuente mantenida a temperatura fija», explica Rafael Sorkin, del Instituto Perimeter de Física Teórica, en Ontario. En otras palabras, su temperatura efectiva sería de cero absoluto. Semejante conclusión contradecía lo observado en los cuerpos negros del mundo real (como un horno, por ejemplo). No obstante, tales problemas desaparecían si, en contra de lo que se pensaba hasta entonces, la energía se radiaba en unidades discretas, o «cuantos».

Los físicos llevan casi medio siglo intentando encontrar una solución equivalente para los agujeros negros. El fallecido Stephen Hawking dio un paso enorme cuando, a mediados de los años setenta, aplicó la teoría cuántica a la radiación en torno a un agujero negro. Al hacerlo, halló que estos objetos tenían asociada una temperatura. Eso implicaba que no solo absorbían energía, sino que también la emitían. Pero, aunque eso llevó los agujeros negros al redil de la termodinámica, agudizó el problema de la irreversibilidad. La radiación saliente se genera en el borde del agujero negro y no transporta información sobre el interior: es energía térmica aleatoria. Y ahora ya no es posible imaginar que la materia original seguirá atrapada en el interior, ya que, a medida que el agujero negro radie, irá encogiéndose hasta acabar desapareciendo por completo.

Dicho problema se conoce como paradoja de la información, pues el agujero negro destruye la información que nos permitiría rebobinar el movimiento de las partículas que caen en él. Si la física de los agujeros negros ha de ser reversible, algo tiene que volver a transportar esa información al exterior. Y, para explicarlo, puede que sea necesario modificar nuestra idea del espaciotiempo.

LOS ÁTOMOS DEL ESPACIOTIEMPO

EL CALOR CORRESPONDE al movimiento aleatorio de las partes microscópicas de un sistema, como las moléculas de un gas. Dado que los agujeros negros pueden calentarse y enfriarse, parece lógico pensar que deberían tener una estructura microscópica. Y, dado que un agujero negro no es más que espacio vacío (la materia que cae en él atraviesa el horizonte, pero no puede permanecer allí), sus partes constituyentes han de ser las del propio espacio. Así pues, una región de espacio vacío puede albergar una enorme complejidad latente.

Incluso las teorías que pretenden conservar la idea tradicional de espaciotiempo acaban por concluir que algo se esconde tras su anodina fachada. A finales de los años setenta, Steven Weinberg, hoy en la Universidad de Texas en Austin, trató de

describir la gravedad de la misma manera que las otras fuerzas. Sin embargo, encontró que el espaciotiempo debía modificarse radicalmente a las escalas más pequeñas.

En un principio, los físicos visualizaron esa estructura microscópica como un mosaico de pequeñas piezas de espacio. Pensaron que, si fuese posible observar la escala de Planck (un tamaño casi inconcebiblemente pequeño, 10^{-35} metros), veríamos algo parecido a un tablero de ajedrez. Pero esto no puede ser correcto. Entre otras razones, porque las líneas de ese retículo crearían direcciones privilegiadas en el espacio, lo que violaría la teoría especial de la relatividad. Por ejemplo, la luz de distintos colores viajaría a velocidades diferentes, tal y como ocurre en un prisma de vidrio. Los efectos que tuviesen lugar a pequeña escala serían difíciles de observar, pero las violaciones de la relatividad resultarían bastante evidentes.

La termodinámica de los agujeros negros arroja aún más dudas sobre la idoneidad de imaginar el espacio como un simple mosaico. Medir el comportamiento térmico de un sistema permite contar sus partes constituyentes. Solo hay que aportar energía y observar el termómetro: si este se dispara, es porque la energía se ha distribuido entre relativamente pocas moléculas. En realidad, lo que estamos midiendo es la entropía del sistema, la cual representa su complejidad microscópica.

Si llevamos a cabo este ejercicio con una sustancia ordinaria, veremos que el número de moléculas crece como el volumen del material: si multiplicamos por 10 el radio de un balón de playa, el número de moléculas en su interior se multiplicará por 1000. Sin embargo, si aumentamos 10 veces el radio de un agujero negro, la cantidad inferida de constituyentes solo crecerá en un factor de 100. El número de «moléculas» que lo forman no parece ser proporcional a su volumen, sino al área de su superficie. Puede que un agujero negro parezca tridimensional, pero se comporta como si solo tuviera dos dimensiones.

Este fenómeno se conoce como «principio holográfico», ya que recuerda a un holograma ordinario. En estos, una imagen tridimensional está generada por una superficie de dos dimensiones. Si el principio holográfico «cuenta» los constituyentes microscópicos del espaciotiempo, construir el espacio debe requerir algo más que empalmar pequeños trozos de él.

En cualquier caso, la relación entre un todo y sus partes casi nunca es tan directa. Una molécula de H_2O no es simplemente un pedacito de agua. Pensemos en el agua líquida: fluye, forma gotas, transmite olas y ondas, se congela y hierve. Una molécula individual no hace nada de eso, ya que se trata de comportamientos colectivos. Del mismo modo, los componentes básicos del espacio no tienen por qué ser espaciales. «Los átomos del espacio no son las porciones más pequeñas posibles del espacio», advierte Daniele Oriti, del Instituto Max Planck de Física Gravitacional de Potsdam. «Son los constituyentes del espacio. Las características geométricas del espaciotiempo son propiedades nuevas, colectivas y aproximadas de un sistema compuesto por muchos de esos átomos.»

La naturaleza exacta de esos componentes básicos depende de la teoría. En la gravedad cuántica de bucles son cuantos de volumen. En la teoría de cuerdas son campos contenidos en la superficie que barre un hilo o bucle de energía («cuerda»). En la teoría M, relacionada con la teoría de cuerdas y tal vez su base, son un tipo especial de partícula. En la teoría de conjuntos causales son eventos conectados por una red de relaciones de causa y efecto. En la teoría del amplituedro y otros planteamientos no hay ningún componente básico, al menos no en un sentido tradicional.

Aunque estas teorías varían, todas ellas tienden a mantener alguna versión del relacionismo de Leibniz, filósofo alemán de los siglos XVII y XVIII. En términos generales, esta idea sostiene que el espacio surge a partir de relaciones entre objetos. Podemos pensarlo como un rompecabezas: uno parte de un montón de piezas, ve como están relacionadas y las coloca en consecuencia. Si dos de ellas guardan propiedades similares, como su color, es probable que estén cerca; si son muy diferentes, probamos a ponerlas lejos. Los físicos suelen expresar estas relaciones como una red con un determinado patrón de conectividad. Las relaciones están dictadas por la teoría cuántica u otros principios, y de ellas se deriva la disposición espacial.

Otra cuestión recurrente son las transiciones de fase. Si el espacio es algo que se monta, también debería poder desmontarse. Sus componentes básicos podrían reorganizarse de tal modo que diesen lugar a algo que no se pareciese en nada al espacio. «Igual que existen diferentes fases de la materia, como el hielo, el agua líquida y el vapor, los átomos del espacio pueden también reconfigurarse en distintas fases», apunta Thanu Padmanabhan, del Centro Interuniversitario de Astronomía y Astrofísica de la India. De acuerdo con esta idea, los agujeros negros serían lugares donde el espacio «se derrite». Aunque las teorías conocidas dejan de funcionar, una más general podría describir lo que sucede en esa nueva fase. Incluso cuando el espacio llega a su fin, la física continúa.

REDES ENTRELAZADAS

EL GRAN AVANCE de los últimos años —y uno que ha cruzado antiguas fronteras entre disciplinas— ha sido la constatación de que en esas relaciones interviene el entrelazamiento cuántico. Este fenómeno parece ser más primitivo que el espacio mismo. Consiste en un tipo de correlación muy fuerte que solo se da en mecánica cuántica. Por ejemplo, si dos partículas entrelazadas salen volando en direcciones opuestas, sus propiedades se mantendrán coordinadas sin importar lo lejos que estén.

Hasta ahora, la expresión gravedad «cuántica» hacía referencia al carácter discreto de la teoría, a las fluctuaciones cuánticas y a casi cualquier otro efecto cuántico conocido, pero nunca al entrelazamiento. Eso cambió al considerar los agujeros negros. En un agujero negro pueden caer partículas entrelazadas. Pero, una vez que el objeto se evapore por completo, sus compañeras en el exterior no estarán entrelazadas con nada. «Hawking debería haberlo llamado el problema del entrelazamiento», apunta Samir Mathur, de la Universidad Estatal de Ohio.

Incluso en el vacío, en ausencia de partículas, los campos electromagnéticos o de otro tipo están entrelazados. Si medimos el campo en dos puntos distantes, las lecturas fluctuarán de una manera aleatoria pero coordinada. Y si dividimos una región en dos, las partes estarán correlacionadas y su grado de correlación dependerá de la única cantidad geométrica que tienen en común: el área de la superficie que las separa. En 1995, Jacobson argumentó que el entrelazamiento ofrecía un vínculo entre la presencia de materia y la geometría del espaciotiempo; es decir, algo que equivaldría a explicar la ley de la gravedad. «Un entrelazamiento mayor implica una gravedad más débil; esto es, un espaciotiempo más rígido», señala.

Varias propuestas de gravedad cuántica, sobre todo la teoría de cuerdas, ven ahora el entrelazamiento como un elemento fundamental. En teoría de cuerdas, el principio holográfico proporciona una receta para crear el espacio, o al menos parte de él. Por ejemplo, un espacio de dos dimensiones puede estar surcado por campos que, estructurados de la manera correcta, generen una dimensión espacial más. El espacio bidimensional original no sería más que el borde de un dominio mayor, y el entrelazamiento sería el «hilo» que entreteje dicho dominio y hace de él un todo continuo.

En 2009, Mark Van Raamsdonk, de la Universidad de la Columbia Británica, propuso un elegante argumento al respecto. Supongamos que los campos en la frontera no están entrelazados, sino que forman dos sistemas independientes. En tal caso, puede argumentarse que corresponden a dos universos separados entre los que no es posible viajar. Sin embargo, cuando los sistemas se entrelazan, es como si se abriera un túnel que conectase ambos universos. A medida que aumenta el grado de entrelazamiento, la longitud de dicho túnel se reduce, acercando esos dos universos hasta que forman uno solo. «La aparición de un espaciotiempo de gran tamaño se encuentra directamente relacionada con el entrelazamiento de esos grados de libertad», explica Van Raamsdonk. Cuando observamos correlaciones en el campo electromagnético u otros campos, corresponden a los vestigios del entrelazamiento que mantiene unido al espacio.

Otras características del espacio, aparte de su continuidad, podrían reflejar el entrelazamiento. Van Raamsdonk y Brian Swingle, ahora en la Universidad de Maryland, argumentan que la ubicuidad del entrelazamiento explica la universalidad de la gravedad (el hecho de que afecte a todos los objetos, sin excepción). En cuanto a los agujeros negros, Leonard Susskind, de Stanford, y Juan Maldacena, del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, han sugerido que el entrelazamiento entre un agujero negro y la radiación que este emite crea un agujero de gusano, una especie de «puerta trasera» al agujero negro. Eso ayudaría a conservar la información y garantizaría la reversibilidad de las leyes físicas [*véase* «Geometría y entrelazamiento cuántico», por Juan Maldacena; Investigación y Ciencia, noviembre de 2015].

Otros investigadores han intentado explicar cómo puede surgir todo el espacio desde cero. Por ejemplo, ChunJun Cao, Spyridon Michalakis y Sean Carroll, del Instituto de Tecnología de California, comienzan con una descripción cuántica minimalista de un sistema, formulada sin referencia directa al espaciotiempo. Con un patrón de correlaciones adecuado, resulta posible dividir el sistema en componentes que pueden identificarse con diferentes regiones del espaciotiempo. En este modelo, el grado de entrelazamiento sirve para definir una noción de distancia espacial.

En física y en las ciencias naturales, el espacio y el tiempo constituyen la base de cualquier teoría. Sin embargo, nunca vemos el espaciotiempo directamente, sino que más bien inferimos su existencia a partir de nuestra experiencia cotidiana. Suponemos que la explicación más económica para los fenómenos que observamos es algún mecanismo que opera dentro del espaciotiempo. Pero la lección fundamental de la gravedad cuántica es que no todos los fenómenos encajan bien en el espaciotiempo. Los físicos aún deben encontrar una nueva estructura fundamental. Cuando lo hagan, habrán completado la revolución que comenzó Einstein hace más de un siglo.

George Musser *es colaborador de* Scientific American *y autor de* Spooky action at a distance *(2015) y* The complete idiot's guide to string theory *(2008).*

ASTRONOMÍA

¿Qué es la materia oscura?

Una escurridiza sustancia presente en todo el universo ejerce múltiples efectos gravitatorios observables, pero elude la detección directa

Lisa Randall

Los físicos y los astrónomos han determinado que la mayor parte de la materia presente en el universo es «materia oscura»: una sustancia cuya existencia puede deducirse a partir de sus efectos gravitatorios, pero no a través de interacciones electromagnéticas, como las que encontramos en la materia ordinaria. A pesar de ser uno de los conceptos más simples de la física, la materia oscura resulta desconcertante desde una perspectiva humana. Tenemos cinco sentidos, y todos ellos tienen su origen último en las interacciones electromagnéticas. La vista, por ejemplo, se basa en nuestra sensibilidad a la luz: ondas electromagnéticas de cierta frecuencia. Podemos ver la materia usual porque los átomos que la forman emiten o absorben luz. La carga eléctrica de electrones y protones es la razón de que podamos ver.

Sin embargo, nada obliga a que toda la materia se componga de átomos, y la mayor parte de ella podría estar hecha de algo totalmente distinto. Llamamos materia a cualquier sustancia que interaccione con la gravedad del mismo modo que la materia normal; por ejemplo, agrupándose en galaxias y cúmulos de galaxias. Sin embargo, un tipo de materia que no presente interacciones electromagnéticas será invisible a nuestros ojos.

La materia oscura carece de carga eléctrica (o tiene tan poca que aún no la hemos podido detectar). Nadie ha conseguido verla con sus ojos ni con ningún instrumento. No obstante, creemos que existe debido a sus múltiples efectos gravitatorios. Estos incluyen los movimientos de las estrellas en una galaxia (cuyas elevadas velocidades no pueden explicarse a partir de la escasa atracción gravitatoria ejercida por la materia visible); los de las galaxias en los cúmulos de galaxias (una vez más, demasiado rápidos para ser causados por la mate-



ria ordinaria); las propiedades del fondo cósmico de microondas; la trayectoria de la materia visible expulsada en las explosiones de supernova; la desviación de la luz causada por el efecto de lente gravitacional; así como la observación de que la materia visible se separa de la invisible en los choques entre cúmulos de galaxias.

Sin embargo, puede que el signo más elocuente de la materia oscura sea nuestra propia existencia. A pesar de ser invisible, la materia oscura ha desempeñado un papel clave en la evolución del universo y en la creación de estrellas, planetas y vida. Ello se debe a que la masa total de materia oscura es cinco veces mayor que la de materia ordinaria, así como al hecho de que la materia oscura no interacciona directamente con la luz. Ambas propiedades fueron cruciales para que las galaxias se formasen en el tiempo en el que lo hicieron y, en particular, para que se creasen las galaxias del tamaño de la Vía Láctea. Sin materia oscura, la radiación habría impedido durante demasiado tiempo que las estructuras galácticas se agrupasen, lo que habría resultado en un universo excesivamente homogéneo. Si la Vía Láctea pudo formarse en el tiempo transcurrido desde la gran explosión, fue gracias a la materia oscura.

Algunas personas se sienten consternadas al oír hablar de materia oscura por primera vez. ¿Cómo puede existir algo que no vemos? Al menos desde la revolución copernicana, deberíamos estar preparados para admitir que no ocupamos un lugar central en el universo. Sin embargo, cada vez que esta idea aparece en un contexto nuevo, mucha gente se muestra sorprendida o desconcertada. No hay ninguna razón para que la materia que vemos sea el único tipo de materia que existe. La presencia de materia oscura es algo que cabía esperar y que resulta compatible con todo lo que sabemos.

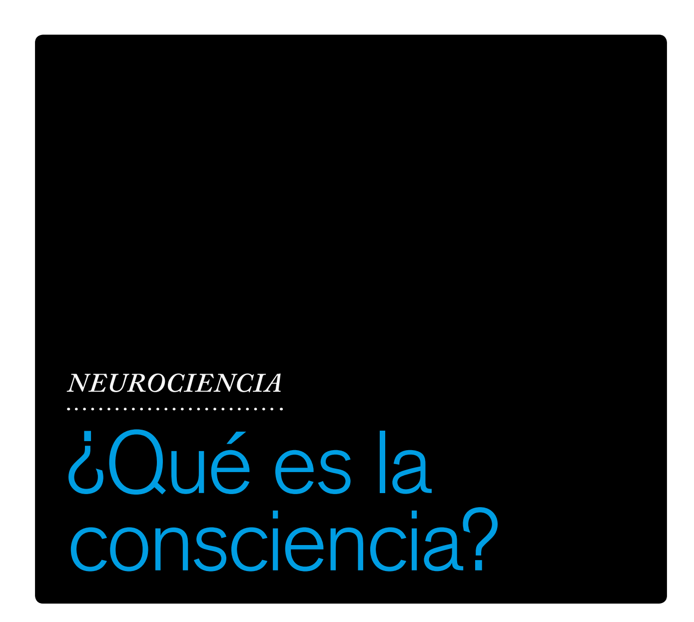
Tal vez parte de la confusión se deba al nombre. En realidad, la materia oscura debería llamarse «materia transparente», ya que la luz simplemente pasa a su través. Sin embargo, su naturaleza es todo menos diáfana. ¿Está formada por un nuevo tipo de partícula elemental? ¿Se compone de objetos compactos pero invisibles, como agujeros negros? Si se trata de una partícula, ¿presenta alguna interacción, por débil que sea, con la materia que conocemos (aparte de la gravitatoria)? ¿Interacciona consigo misma? ¿Hay más de un tipo de partícula de esta clase? ¿Presenta alguna de ellas interacciones de cualquier índole?

A lo largo de los años, los físicos teóricos hemos propuesto varias posibilidades. Pero, en última instancia, solo descubriremos la naturaleza de la materia oscura con ayuda de más observaciones. Estas quizá consistan en mediciones más detalladas de sus efectos gravitatorios. O, si hay suerte y la materia oscura interacciona con la ordinaria, tal vez sus constituyentes dejen su impronta en los detectores subterráneos, en los satélites espaciales o en los colisionadores de partículas. Pero incluso si eso no ocurre, las interacciones de la materia oscura consigo misma podrían tener consecuencias observables. Por ejemplo, si reorganizan la materia en los centros galácticos, la estructura interna de las galaxias será diferente a pequeña escala. Y las brillantes nubes de gas y estrellas podrían también indicar la existencia de una o más especies de partículas de materia oscura que interaccionen entre sí. Por último, esta misteriosa sustancia tal vez se componga de axiones, partículas hipotéticas que interaccionarían con campos magnéticos y que podrían detectarse en el laboratorio o en el espacio.

Para un físico —teórico, observacional o experimental—, la materia oscura constituye un prometedor objetivo de investigación, ya que sabemos que existe pero ignoramos lo que es. La razón está clara: simplemente, no interacciona lo suficiente para decírnoslo, al menos por el momento. Como seres humanos, no hay mucho más que podamos hacer si la materia ordinaria permanece indiferente a cualquier cosa que no sea la mera existencia de la materia oscura. Pero, si presenta otras propiedades interesantes, los investigadores las encontrarán. Y, en el proceso, nos ayudarán a abordar de una manera más completa este maravilloso misterio.

Lisa Randall *es física teórica y titular de la cátedra Frank B. Baird Jr. de Harvard. Ha escrito varios libros, entre ellos* La materia oscura y los dinosaurios: La sorprendente interconectividad del universo *(Acantilado, 2016).*





¿Qué es la consciencia?

Los científicos comienzan a descifrar un misterio que llevaba años exasperando a los filósofos

Christof Koch

LA CONSCIENCIA ES TODO LO QUE EXPERIMENTAMOS. Es una melodía pegadiza en la cabeza, el dulzor de la *mousse* de chocolate, el malestar que causa un dolor de muelas, el amor incondicional por un hijo y la amargura de saber que todas las pasiones se acaban.

El origen y la naturaleza de esas experiencias, a veces denominadas *qualia*, ha sido un misterio desde los albores de la antigüedad hasta nuestros días. Multitud de filósofos modernos que analizan la mente, entre los que cabría destacar quizás a Daniel Dennett, de la Universidad Tufts, consideran que la existencia de la consciencia es una ofensa tan intolerable contra lo que creen que debería ser un universo material e irrelevante y el vacío, que la califican como mera ilusión. Es decir, o niegan que existan los *qualia,* o bien defienden que la ciencia nunca sacará de ellos nada de provecho.

Si semejante afirmación fuese cierta, este artículo sería brevísimo. Todo lo que necesitaría explicarles es por qué usted, yo, y casi todo el mundo estamos absolutamente convencidos de que tenemos sensaciones. Si tuviéramos un flemón, el tormento no se reduciría ni un ápice con razonamientos enrevesados que pretendieran persuadirnos de que el dolor es un delirio. Como esta solución desesperada del problema psicosomático no me encandila lo más mínimo, seguiré adelante.

La mayoría de los académicos aceptan que la consciencia es algo consolidado y buscan entender su relación con el mundo objetivo descrito por la ciencia. Hace más de un cuarto de siglo, junto con Francis Crick, decidimos apartarnos de los debates filosóficos sobre la consciencia (que llevaban ocupando a los eruditos desde, como mínimo, los tiempos de Aristóteles) y decidimos buscar su huella física. ¿Qué pasaría si la consciencia emanara de una región del cerebro muy excitable? Si llegáramos a saberlo, nos acercaríamos a la solución del problema fundamental.

En concreto, buscamos las correlaciones neuronales de la consciencia (CNC), definidas como los mecanismos neuronales mínimos que, juntos, bastan para cualquier experiencia consciente concreta. ¿Qué debe suceder en el cerebro para que experimentemos un dolor de muelas, por ejemplo? ¿Vibrarán algunas células nerviosas a una frecuencia mágica? ¿Tienen que activarse algunas «neuronas de la consciencia» especiales? ¿En qué regiones del cerebro están ubicadas?

CORRELACIONES NEURONALES DE LA CONSCIENCIA

A LA HORA DE DEFINIR LAS CNC, el calificativo «mínimo» adquiere importancia. Al fin y al cabo, el cerebro entero se podría considerar una CNC, pues es un generador incesante de experiencias. Pero es posible delimitar mejor la sede de la consciencia. Tomemos la médula espinal, un tubo flexible de medio metro que alberga mil millones de células nerviosas, encerrado en la columna vertebral. Cuando la médula queda completamente seccionada por un traumatismo en la región cervical, quedan paralizados las piernas, los brazos y el tronco, se pierde el control de la micción y la defecación, y desaparece la sensibilidad corporal. Aun así, los tetrapléjicos siguen experimentando la vida en toda su diversidad: ven, oyen, huelen, sienten emociones y recuerdan lo vivido antes del percance que trastocó su vida.

Ahora bien, pensemos en el cerebelo, ese «cerebrito» ubicado debajo de la parte posterior del encéfalo. Se trata de uno de los centros nerviosos más antiguos en términos evolutivos e interviene en el control del movimiento, la postura y la marcha, así como en la ejecución de las secuencias complejas de movimientos. Entre las actividades que controla se encuentran tocar el piano, mecanografiar, patinar sobre hielo o escalar. Contiene las neuronas más sobresalientes del encéfalo, las células de Purkinje, provistas de zarcillos que se extienden como un abanico de coral y exhiben una dinámica eléctrica compleja. También alberga, con mucho, el grueso de las neuronas, unos 69 mil millones (principalmente células granulosas del cerebelo en forma de estrella), cuatro veces más que las del resto del encéfalo.

¿Qué le sucede a la consciencia si un pedazo del cerebelo se pierde a causa de un accidente cerebrovascular o por el bisturí del cirujano? Pues muy poco: los enfermos cerebelares se quejan de algunas carencias, como la pérdida de soltura ante el teclado del piano o del ordenador, pero la consciencia permanece intacta. Oyen, ven y se sienten bien, conservan el sentido de sí mismos, recuerdan los sucesos pasados y se siguen proyectando a sí mismos en el futuro. Incluso nacer sin cerebelo no afecta de manera apreciable a la experiencia consciente del individuo.

¿Por qué el inmenso aparato cerebeloso es irrelevante para la experiencia subjetiva? Se pueden hallar pistas importantes dentro de su circuitería, extremadamente uniforme y paralela (como la conexión de las pilas en paralelo). El cerebelo es prácticamente un circuito anterógrado: un grupo de neuronas alimenta al siguiente, que a su vez influye en un tercero. No hay bucles complejos de retroalimentación en los que la actividad

eléctrica reverbere de un lado a otro (a juzgar por lo que tarda en aparecer la percepción consciente, la mayoría de los teóricos deducen que deben participar bucles de retroalimentación dentro del circuito cavernoso del cerebro). Además, desde el punto de vista funcional, el cerebelo se divide en cientos de módulos de cálculo independientes. Cada uno opera en paralelo, con entradas y salidas bien diferenciadas, que no se solapan, con las que controla los movimientos de los diversos sistemas motores o cognitivos, casi sin interacciones entre los módulos (otro rasgo indispensable de la consciencia).

Muy importante: la médula espinal y el cerebelo nos enseñan que el genio de la consciencia no aparece solo cuando se excita un tejido neural, se precisa algo más. Este factor adicional radica en la sustancia gris, que forma la corteza cerebral (la superficie externa del cerebro). Se trata de una lámina estratificada de tejido nervioso enmarañado de conexiones, con el tamaño y el grosor de una pizza de 35 centímetros. En el cráneo están embutidas dos de esas láminas, muy plegadas, junto con sus cientos de millones de cables (la sustancia blanca). Todos los datos indican que las sensaciones se generan en el tejido neocortical.

Aún es posible acotar más la sede de la consciencia. Tomemos, por ejemplo, los experimentos en que se envían estímulos distintos al ojo izquierdo y al derecho. Supongamos que el izquierdo solo ve una foto de Donald Trump y que el derecho tiene ante sí una de Hillary Clinton. Quizás imaginemos que se vería una superposición extraña de Trump y Clinton, pero, en realidad, aparecerá Trump unos segundos, se esfumará y aparecerá Clinton, que hará lo mismo para dar paso de nuevo a Trump. Ambas imágenes se alternarán sin fin debido a lo que los neurocientíficos llaman rivalidad binocular: como el cerebro recibe una señal ambigua, no puede decidir entre Trump o Clinton.

Si en ese momento estamos tumbados dentro de un aparato de resonancia magnética que registra la actividad cerebral, este la detectará en un conjunto amplio de regiones corticales, reunidas bajo el nombre de zona caliente posterior. Se trata de las regiones parietal, occipital y temporal de la parte posterior de la corteza (*véase el recuadro* «Las huellas de la experiencia») cuya función principal consiste en seguir lo que vemos. Curiosamente, la corteza visual primaria que recibe y transmite el torrente de información que entra por los ojos no dice lo que está viendo el sujeto. En el oído y el tacto se constata una jerarquía funcional parecida: las cortezas auditiva y somatosensitiva primarias no contribuyen directamente al contenido de las experiencias de esa naturaleza. Son las siguientes etapas del proceso, radicadas en la zona caliente posterior, las que dan lugar a la percepción consciente, como la imagen de Trump o de Clinton.

Lo más revelador son dos fuentes clínicas de indicios causales: la estimulación eléctrica del tejido cortical y el estudio de los pacientes que han perdido una región concreta por lesión o enfermedad. Antes de extirpar un tumor cerebral o el núcleo de las crisis epilépticas, los neurocirujanos ubican las funciones del tejido cortical cercano mediante la estimulación directa con electrodos. La estimulación de la zona caliente posterior desencadena toda una serie de sensaciones y percepciones: destellos luminosos, formas geométricas, distorsiones faciales, alucinaciones auditivas o visuales, una sensación de familiaridad o irrealidad, el deseo imperioso de mover una extremidad concreta, etcétera. La estimulación de la corteza frontal es otra cosa, ya que no suele desencadenar ninguna experiencia directa.

Los pacientes neurológicos de la primera mitad del siglo xx constituyen una segunda fuente de conocimiento. Los cirujanos a veces se vieron obligados a extirpar una tira grande de corteza prefrontal para extraer tumores o paliar las crisis epilépticas. Lo destacable de todo esto es lo anodinos que eran estos pacientes. La pérdida de una parte del lóbulo frontal tenía efectos perjudiciales concretos: el paciente había perdido la inhibición de las emociones o las acciones inadecuadas, presentaba carencias motoras o repetía sin control ciertas acciones o palabras. En cambio, la personalidad y el coeficiente intelectual mejoraban, y el operado continuaba viviendo durante muchos años sin ningún indicio de que la drástica extirpación del tejido frontal hubiera alterado su experiencia consciente. Y a la inversa, la extirpación de regiones muy pequeñas de la corteza posterior, donde reside la zona caliente, desencadena una pérdida de bloques completos de contenido consciente: el paciente es incapaz de reconocer caras ni de apreciar el movimiento, el color o el espacio.

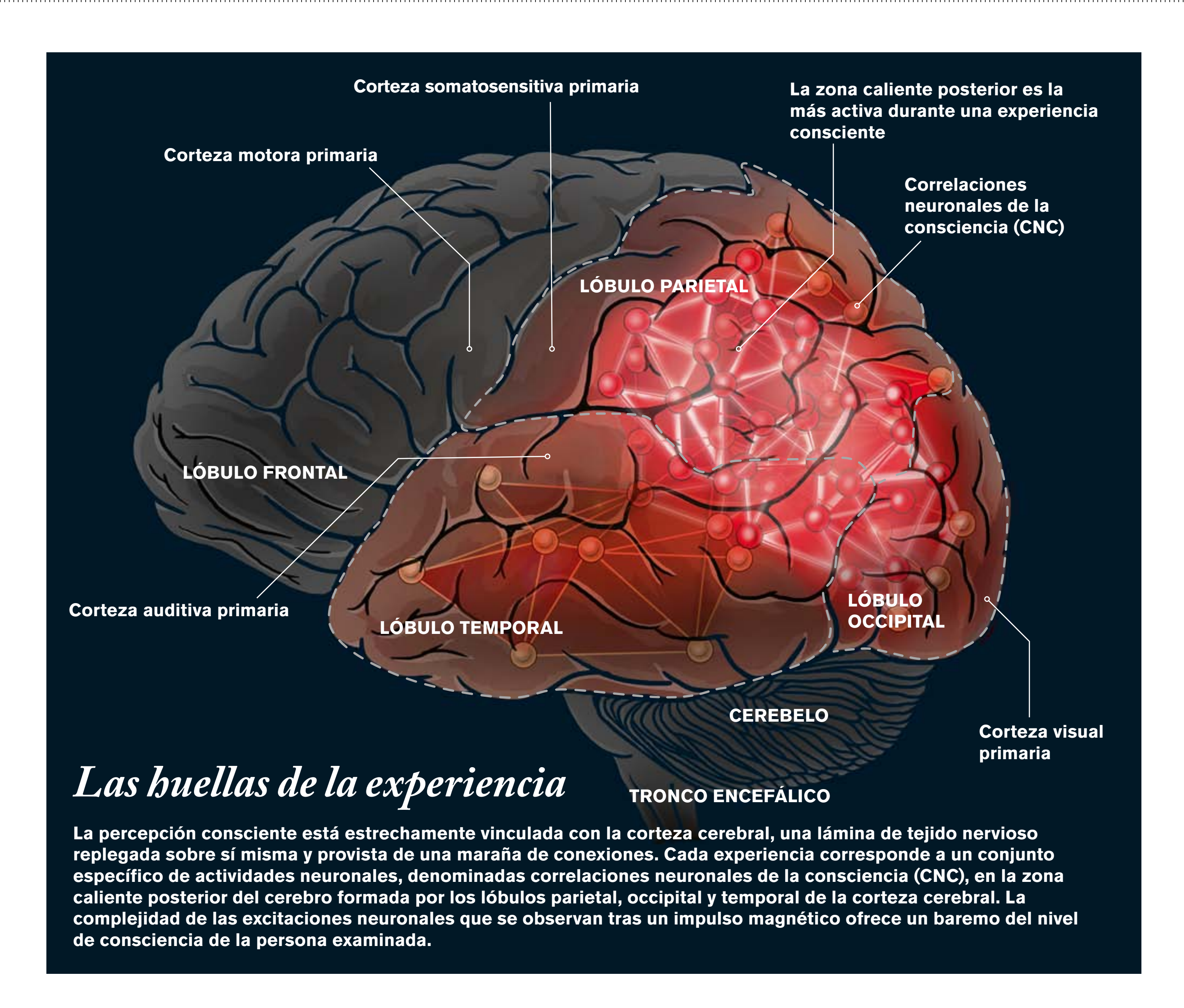
Así pues, parece que nuestra forma de experimentar lo que vemos, lo que oímos y otras sensaciones vitales se originan en regiones de la corteza posterior, donde, por lo que sabemos, también se originan casi todas las experiencias conscientes. ¿Qué diferencia a tales regiones posteriores de la mayor parte de la corteza prefrontal que no contribuye directamente al contenido subjetivo? Solo sabemos que no lo sabemos. A pesar de todo, un hallazgo reciente indica que cada vez estamos más cerca de conocerlo.

EL MEDIDOR DE LA CONSCIENCIA

EN LA PRÁCTICA MÉDICA sigue faltando un dispositivo que detecte la consciencia en las personas incapacitadas o con lesiones. Por ejemplo, antes de entrar en el quirófano se anestesia al enfermo para que permanezca inmóvil, con la tensión arterial estable, y no perciba dolor ni guarde recuerdos traumáticos. Por desgracia, no siempre sucede así: cada año, cientos de pacientes conservan parte de la consciencia pese a la anestesia.

Otros, como los que sufren graves lesiones cerebrales a raíz de accidentes, infecciones o intoxicaciones de suma gravedad, pueden vivir años sin poder hablar ni responder a las peticiones verbales. Para la medicina, saber si perciben algo constituye un dilema profundo. Imaginemos un astronauta que vaga a la deriva por el espacio y escucha cómo intentan contactar con él, pero la radio está averiada y muda, por lo que no existe para el mundo. Es el mismo aislamiento absoluto que sufren los pacientes cuyas lesiones cerebrales impiden toda comunicación.

A principios del milenio, Giulio Tononi, de la Universidad de Wisconsin en Madison, y Marcello Massimini, hoy en la Universidad de Milán, idearon una técnica denominada «zap y zip» destinada a comprobar si alguien permanece consciente o no [*véase* «¿Es mensurable la consciencia?», por Christof Koch; Investigación y ciencia. enero de 2018]. Adosaron una bobina de cable envainado a la cabeza y la «acribillaron» (*zapped*) con un potente impulso magnético, lo que indujo una breve corriente eléctrica en las neuronas subyacentes. A su vez, la perturbación excitó e inhibió las células asociadas a las neuronas en las regiones conectadas, en una cadena de reverberaciones que se propagó por la corteza, hasta que la actividad se extinguió. Una red de sensores electroencefalográficos, colocados sobre la cabeza, grabó esas señales eléctricas. A medida que se desplegaban con el tiempo, los trazos, cada uno perteneciente



Las huellas de la experiencia

La percepción consciente está estrechamente vinculada con la corteza cerebral, una lámina de tejido nervioso replegada sobre sí misma y provista de una maraña de conexiones. Cada experiencia corresponde a un conjunto específico de actividades neuronales, denominadas correlaciones neuronales de la consciencia (CNC), en la zona caliente posterior del cerebro formada por los lóbulos parietal, occipital y temporal de la corteza cerebral. La complejidad de las excitaciones neuronales que se observan tras un impulso magnético ofrece un baremo del nivel de consciencia de la persona examinada.

MESA SCHUMACHER

a una posición concreta del cerebro por debajo del cráneo, conformaban una película.

Esas grabaciones ni dibujaban un patrón estereotípico ni eran completamente aleatorias. Hay que destacar que cuanto más predecibles eran los altibajos del ritmo, más probable era que el cerebro estuviera inconsciente. Los investigadores cuantificaron esta intuición mediante la compactación de los datos de la película con un algoritmo corriente, usado para la compresión de archivos informáticos (*zip*). La compresión permitió estimar la complejidad de la respuesta cerebral. Los voluntarios que permanecían despiertos mostraban un «índice de complejidad de la perturbación» entre 0,31 y 0,70, que caía por debajo de 0,31 si dormían profundamente o permanecían anestesiados. Massimini y Tononi sometieron a la prueba «zap y zip» a 48 enfermos con lesiones cerebrales, que respondían y estaban despiertos: el método confirmó las pruebas conductuales de la consciencia.

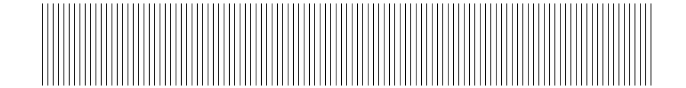
A continuación, el equipo aplicó el método a 81 pacientes que conservaban una consciencia mínima o permanecían en estado vegetativo. En el primer grupo, que mostraba algunos signos de comportamiento irreflexivo, el método predijo correctamente que 36 de los 38 enfermos conservaban la consciencia, pero diagnosticó mal a los otros dos. De los 43 enfermos en estado vegetativo con los que habían fracasado todos los intentos clínicos de establecer comunicación, 34 se consideraron inconscientes. Falló con los otros nueve porque el cerebro respondió como el de los controles conscientes, lo que implicaba que estaban conscientes pero eran incapaces de comunicarse con sus seres queridos.

Los estudios en curso buscan armonizar y mejorar el método de zap y zip en los pacientes neurológicos y extenderlo a los pacientes de psiquiatría y pediatría. Tarde o temprano se descubrirán todos los mecanismos neuronales que generan una experiencia. Pero, aunque estos hallazgos tendrán una gran repercusión clínica y podrían socorrer a familiares y amigos, no responderán algunas cuestiones fundamentales: ¿por qué esas neuronas y no otras? ¿Por qué esa frecuencia concreta y no otra? De hecho, sigue siendo un misterio cómo y por qué un pedazo sumamente organizado de tejido cerebral genera la sensación de consciencia. Al fin y al cabo, el cerebro es como cualquier otro órgano y está sujeto a las mismas leyes de la física que el corazón o el hígado. ¿Qué lo hace diferente? ¿Hay explicación biofísica para el pedazo de sustancia gris sumamente excitable que se vuelve gelatina dentro de los magníficos Sensurround y Technicolor con los que se teje la experiencia cotidiana?

A la postre, lo que necesitamos es una teoría científica de la consciencia que prediga en qué condiciones percibe las experiencias cualquier sistema físico, tanto si el circuito complejo lo forman neuronas como transistores de silicio. Además, ¿por qué varía la calidad de esas experiencias? ¿Por qué sentimos que un cielo azul despejado es tan distinto del chirrido estridente de un violín desafinado? ¿Cumplen alguna función esas diferencias sensoriales?, y en tal caso, ¿cuál es? Tal teoría nos permitiría predecir qué sistemas tienen experiencias. En ausencia de una hipótesis con predicciones comprobables, cualquier especulación sobre la consciencia de las máquinas se basa únicamente en nuestra intuición, una guía poco fiable según nos demuestra la historia de la ciencia.

Las dos teorías sobre la consciencia que gozan de más adeptos han sido objeto de un acalorado debate. La primera es el espacio de trabajo neuronal global (EtNG, en inglés *Global Neuronal Workspace*) del psicólogo Bernard J. Baars y los neurocientíficos Stanislas Dehaene y Jean-Pierre Changeaux. La teoría parte de la observación de que, cuando somos conscientes de algo, son muchas las partes del cerebro que tienen acceso a dicha información. En cambio, si actuamos de manera inconsciente, la información radica en el sistema sensitivomotor que esté implicado. Por ejemplo, cuando tecleamos con rapidez, lo hacemos sin pensar. Si nos preguntan cómo lo hacemos, no sabríamos explicarlo: tenemos poco acceso consciente a esa información que, vaya casualidad, también está localizada en los circuitos cerebrales que conectan los ojos con los movimientos rápidos de los dedos.

¿Hay explicación biofísica para el pedazo de sustancia gris que se vuelve gelatina dentro de los magníficos Sensurround y Technicolor con los que se teje la experiencia cotidiana?



HACIA UNA TEORÍA FUNDAMENTAL

EL ETNG DEFIENDE que la consciencia surge de un tipo de procesamiento de la información que ya se conocía desde los inicios de la inteligencia artificial, cuando los programas especializados tenían que acceder a un pequeño repositorio de información compartida. Cualquier dato que se escribiera sobre esa «pizarra» quedaba disponible para los procesos secundarios: memoria de trabajo, lenguaje, módulo de planificación, etcétera. Según el EtNG, la consciencia aflora cuando la información sensitiva entrante, inscrita en tal pizarra, se difunde por todos los sistemas cognitivos, que los procesan para hablar, guardar o recuperar un recuerdo, o ejecutar una acción.

Como cabe poco en la pizarra, solo podemos ser conscientes de una información mínima en cada instante. Se ha propuesto que la red de neuronas que difunde estos mensajes radicaría en los lóbulos frontal y parietal. Una vez que ese pequeño volumen de datos se difunde por dicha red y queda accesible para todos, la información se vuelve consciente, es decir, el sujeto toma consciencia de ella. Que las máquinas actuales alcancen ese nivel de sofisticación cognitiva es solo cuestión de tiempo. El EtNG plantea que los ordenadores del futuro serán conscientes.

La teoría de la información integrada (TII), concebida por Tononi y sus colaboradores, entre los que me incluyo, parte de algo muy diferente: la propia experiencia. Cada experiencia posee determinadas propiedades esenciales: es intrínseca (existe solo para el sujeto que la «posee»), está estructurada (un taxi amarillo frena cuando se le cruza un perro callejero), es específica (distinta de cualquier otra experiencia consciente, como cada fotograma de una película), y, además, está unificada y definida. Cuando nos sentamos en un banco del parque un día soleado, mientras miramos cómo juegan los niños, las diversas partes de la experiencia (la brisa en el pelo o el placer de oír la risa de un chiquillo) no se pueden separar sin que la experiencia deje de ser lo que es.

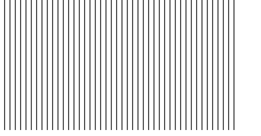
Tononi sostiene que las propiedades anteriores las tendrá cualquier mecanismo complejo e interconectado cuya estructura codifique un conjunto de relaciones de causa y efecto, del mismo modo que también poseerá cierto nivel de consciencia. Se sentirá como algo interior. Pero si el mecanismo carece de integración y complejidad, como el cerebelo, no será consciente de nada. Tal y como la TII sostiene, la consciencia es un poder causal intrínseco asociado a mecanismos complejos, como el cerebro.

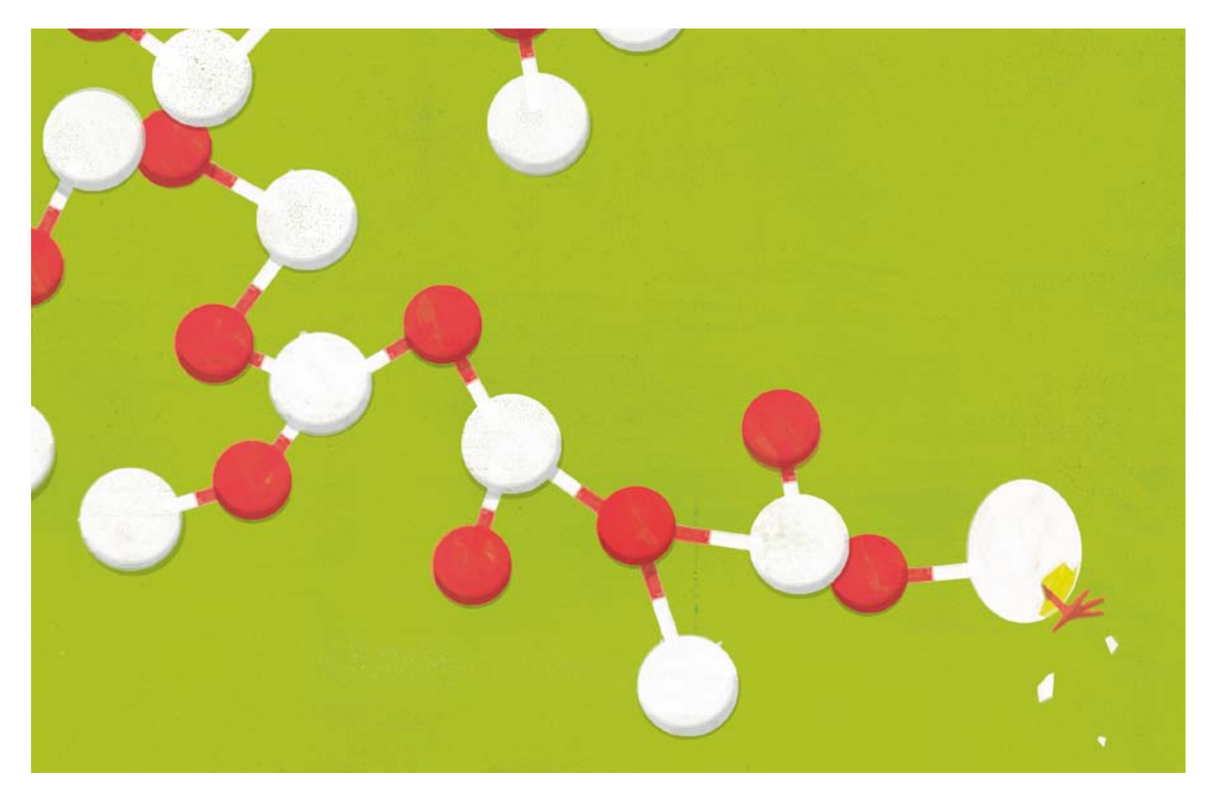
La TII también ofrece, a partir de la complejidad de la estructura subyacente de interconexiones, un único número positivo Φ (fi) para cuantificar esta consciencia. Si Φ es cero, el sistema no siente nada como propio. En cambio, cuanto mayor es, más poder causal intrínseco posee el sistema y más consciente es. El cerebro, provisto de una conectividad enorme y sumamente específica, posee un Φ muy alto, lo que implica un alto grado de consciencia. La TII explica una serie de observaciones, como por qué el cerebelo no contribuye a la consciencia y por qué funciona el baremo de zap y zip (el valor determinado es una burda aproximación de Φ).

La TII también predice que la ejecución de una simulación sofisticada del cerebro humano en un ordenador digital no puede ser consciente, ni tan siquiera si consiguiera hablar como un ser humano. Al igual que la simple simulación de la atracción gravitatoria masiva de un agujero negro no deforma ni el tiempo ni el espacio en torno al ordenador que contiene el código astrofísico, la programación de la consciencia nunca creará un ordenador consciente. La consciencia no se puede informatizar, sino que debe formar parte de la estructura del sistema.

Quedan dos retos: el primero es recurrir a las herramientas cada vez más refinadas que tenemos a disposición para sondear las inmensas y heterogéneas coaliciones de neuronas que conforman el cerebro para delimitar con más precisión las huellas neuronales de la consciencia. A esto le quedan décadas por delante, dada la complejidad bizantina del sistema nervioso central. El segundo consiste en verificar o rebatir las dos teorías dominantes. O si no, construir otra mejor a partir de ambas para explicar el rompecabezas central de nuestra existencia: cómo mana la sensación de vivir desde un órgano de kilo y medio con la consistencia del tofu.

Christof Koch *es investigador principal y presidente del Instituto Allen de Ciencias del Cerebro, en Seattle. Forma parte del comité asesor de* Scientific American *y es autor de numerosos libros, entre ellos* Consciousness: Confessions of a romantic reductionist *(2012).*





BIOLOGÍA

¿Cómo nació la vida?

Desentrañar el origen de los seres vivos exigirá experimentos a escala molecular y observaciones a escala astronómica

Jack Szostak

Que en la Tierra apareciera la vida, ¿fue una mera cuestión de azar o la consecuencia inexorable de las leyes naturales? ¿Es fácil que la vida surja en un planeta recién formado o es el fruto de una larga concatenación de acontecimientos rayana en lo imposible? Los avances en campos como la astronomía, las ciencias planetarias y la química nos dan la esperanza de que la respuesta a cuestiones tan trascendentes pueda estar a la vuelta de la esquina. Si la vida brotó varias veces en nuestra galaxia, como los científicos ansían descubrir, el camino no debería ser tan arduo. Además, si se demuestra que la distancia que separa la química de la biología se recorre con facilidad, el universo podría bullir de vida.

El descubrimiento de miles de exoplanetas ha propiciado el renacimiento de los estudios sobre el origen de la vida. Para sorpresa nuestra, casi todos los sistemas solares recién descubiertos parecen muy distintos del nuestro. ¿Significa esto que hay algo muy singular en nuestro sistema que favorece la génesis de la vida? La detección de signos de vida en un planeta que orbite en una estrella lejana no va a ser nada fácil, pero la tecnología para extraer poco a poco esos ínfimos indicios biológicos avanza con tal celeridad que, con suerte, en una o dos décadas podríamos detectar vida remota.

Para entender cómo pudo gestarse la vida, primero hemos de descifrar cómo —y con qué ingredientes— se crean los planetas. Una nueva generación de radiotelescopios, sobre todo el ALMA (*Gran Conjunto Milimétrico/Submilimétrico de Atacama*) en el desierto chileno de Atacama, ha proporcionado hermosas imágenes de discos protoplanetarios y mapas de su composición química. Así, se están mejorando los modelos de formación de los planetas a partir del polvo y de los gases de un disco. En el seno de nuestro sistema solar, la misión Rosetta ha visitado un cometa, y OSIRIS-REx visitará un asteroide e intentará traer muestras de él, lo que nos podría brindar el inventario esencial de los materiales que conformaron nuestro planeta.

Una vez que se ha formado un planeta como la Tierra (ni demasiado caliente ni demasiado frío, ni seco ni húmedo en exceso), ¿qué reacciones químicas generan los elementos fundamentales de la vida? En los años cincuenta, el histórico experimento de Miller y Urey, que acribilló una mezcla de agua y sustancias sencillas con descargas eléctricas (que imitaban el impacto de los relámpagos), demostró que los aminoácidos, los componentes básicos de las proteínas, se creaban con facilidad. En cambio, otras moléculas propias de la vida costaban más de sintetizar, y hoy resulta evidente que hemos de rediseñar por entero el camino que lleva de la química a la vida. La razón principal gira en torno a la versatilidad del ARN, una molécula de enorme longitud que desempeña numerosas funciones básicas en todas las formas de vida conocidas. El ARN no solo actúa como una enzima, sino que

almacena y transmite información. Conviene destacar que las proteínas de los organismos se sintetizan gracias a la actividad catalítica del ARN que forma parte del ribosoma (la máquina celular que lee la información genética y fabrica las proteínas). De ello se deduce el papel preponderante del ARN en los inicios de la evolución de la vida.

Hoy, la pregunta central de la investigación sobre el origen de la vida es cómo la química en la Tierra primigenia dio lugar al ARN y a las células que lo contienen. Algunos opinan que la vida empezó con moléculas más sencillas y que el ARN surgió después, mientras que otros abordan el origen del ARN sin rodeos. El resultado es que estas ideas nuevas están revolucionando el tranquilo remanso de la investigación química. Los escenarios geoquímicos preferidos son las regiones volcánicas o los cráteres por impacto, cuya química orgánica es compleja, contienen varias fuentes de energía y presentan ciclos dinámicos de luz-oscuridad, frío-calor y humedad-aridez. Lo sorprendente es que muchos intermediarios químicos del ARN cristalizan en las mezclas de reacción, se autopurifican y, en principio, se acumularían en la Tierra primigenia como minerales orgánicos a modo de depósitos de material que cobrarían vida cuando las condiciones cambiasen.

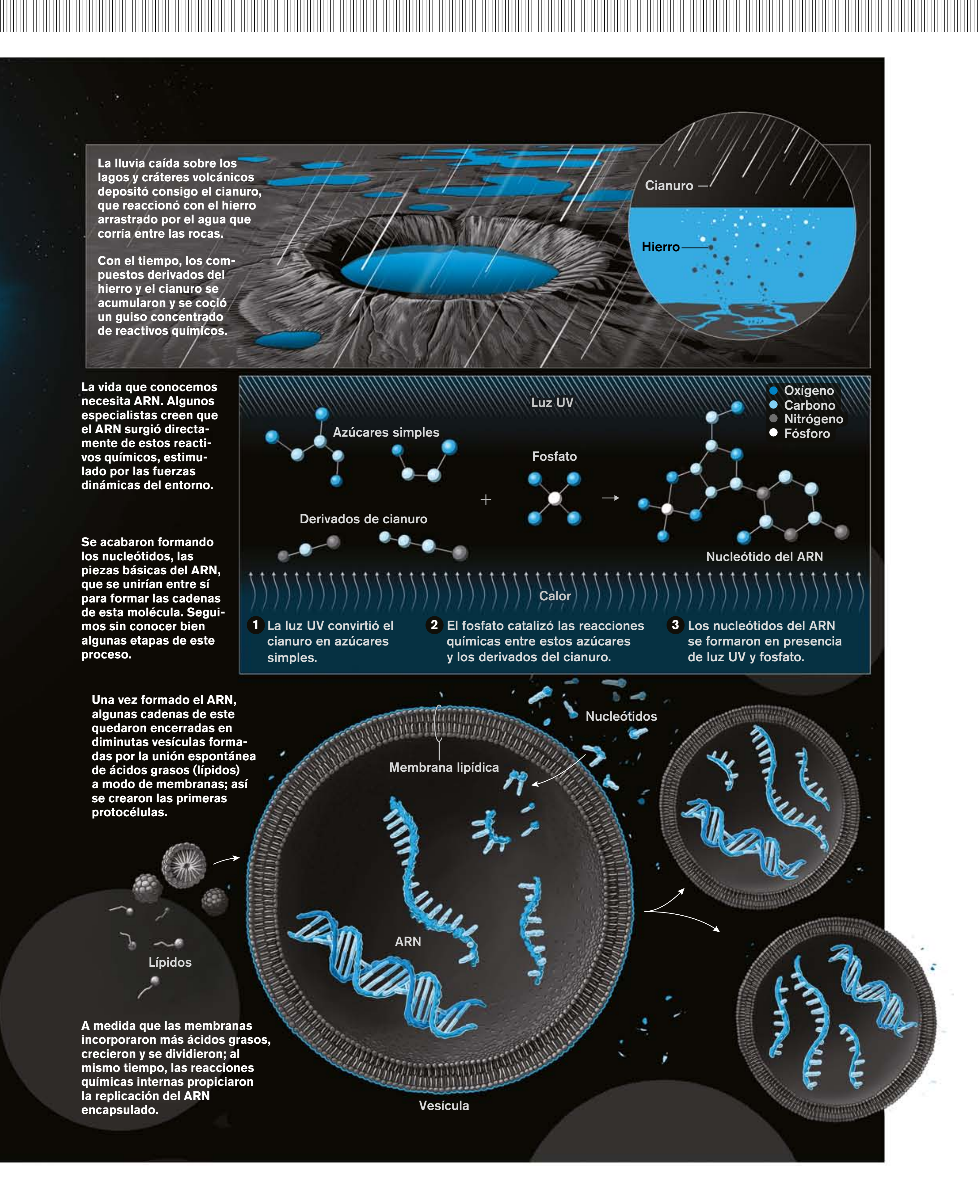
Aun suponiendo que el problema clave esté resuelto, queda por saber cómo se replicó el ARN en el seno de las primeras células primitivas. Ahora empezamos a conocer las fuentes de energía química que pudieron posibilitar la autorreplicación del ARN, pero queda mucho por hacer. Si superamos esos obstáculos, tal vez seremos capaces de construir células con ARN que evolucionen y se repliquen en el laboratorio, con lo que se recapitularía una de las posibles vías que dieron origen a la vida.

¿Qué vendrá después? Los químicos ya se preguntan si el tipo de vida al que pertenecemos se gesta a través de una única vía verosímil o si existirían otras rutas para pasar de la química sencilla a la vida basada en el ARN y a la biología moderna. Otros exploran variaciones de la química biológica y buscan las claves en la posible diversidad de la vida que pueda haber «ahí afuera», en el universo. Si todo va bien, acabaremos conociendo la robustez de la transición que separa la química de la biología y, por lo tanto, si el universo está lleno de formas de vida o si sería estéril de no ser por nosotros.

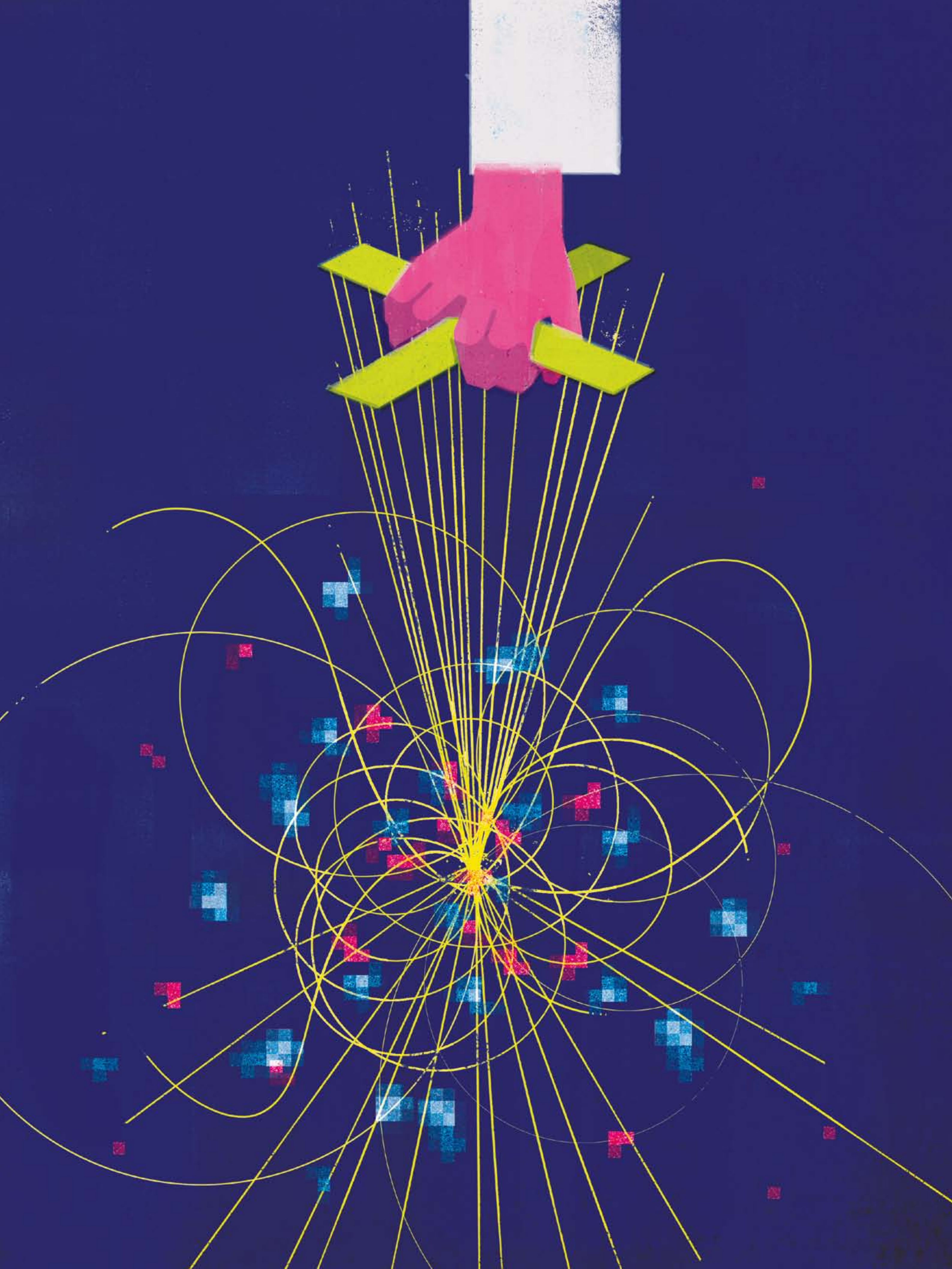
Jack Szostak *es catedrático de genética en la facultad de medicina de Harvard y uno de los galardonados con el premio Nobel de fisiología o medicina en 2009.*

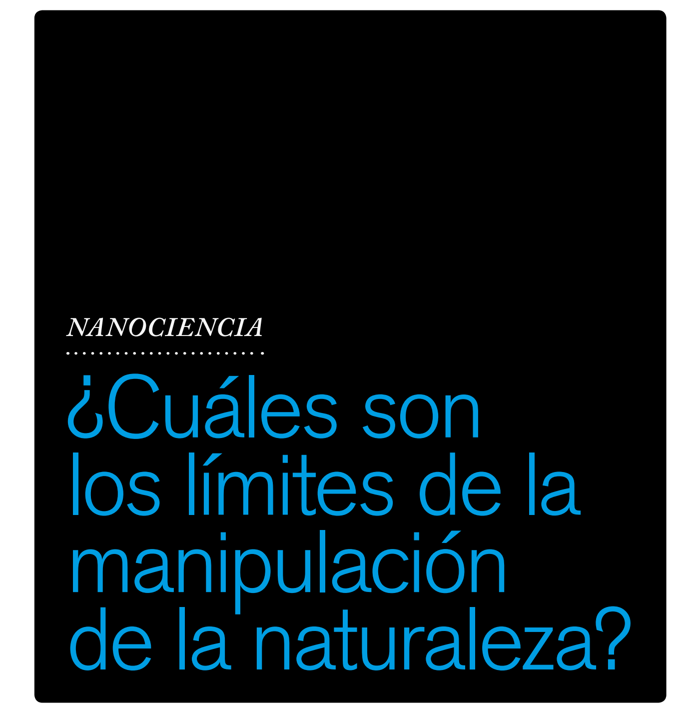


ILUSTRACIÓN DE MATTHEW TWOMBLY



La lluvia caída sobre los lagos y cráteres volcánicos depositó consigo el cianuro, que reaccionó con el hierro arrastrado por el agua que corría entre las rocas.
Con el tiempo, los compuestos derivados del hierro y el cianuro se acumularon y se coció un guiso concentrado de reactivos químicos.
Cianuro
Hierro
La vida que conocemos necesita ARN. Algunos especialistas creen que el ARN surgió directamente de estos reactivos químicos, estimulado por las fuerzas dinámicas del entorno.
Luz UV
Oxígeno
Carbono
Nitrógeno
Fósforo
Azúcares simples
Fosfato
Derivados de cianuro
Nucleótido del ARN
Calor
Se acabaron formando los nucleótidos, las piezas básicas del ARN, que se unirían entre sí para formar las cadenas de esta molécula. Seguimos sin conocer bien algunas etapas de este proceso.
1 La luz UV convirtió el cianuro en azúcares simples.
2 El fosfato catalizó las reacciones químicas entre estos azúcares y los derivados del cianuro.
3 Los nucleótidos del ARN se formaron en presencia de luz UV y fosfato.
Una vez formado el ARN, algunas cadenas de este quedaron encerradas en diminutas vesículas formadas por la unión espontánea de ácidos grasos (lípidos) a modo de membranas; así se crearon las primeras protocélulas.
Nucleótidos
Membrana lipídica
ARN
Lípidos
A medida que las membranas incorporaron más ácidos grasos, crecieron y se dividieron; al mismo tiempo, las reacciones químicas internas propiciaron la replicación del ARN encapsulado.
Vesícula





NANOCIENCIA

¿Cuáles son los límites de la manipulación de la naturaleza?

Al internarse en el mundo cuántico, los científicos aspiran a obtener un mayor control sobre la materia y la energía

Neil Savage

EN UN LABORATORIO EN PENUMBRA, Matt Trusheim acciona un interruptor y un intenso láser verde ilumina un diminuto diamante situado bajo el objetivo de un microscopio. Una imagen aparece en la pantalla de un ordenador: una difusa nube verde salpicada de puntos brillantes, que corresponden a centros de color en el cristal, defectos minúsculos en los que un solo átomo de estaño sustituye a dos de carbono, con lo que la luz que lo atraviesa pasa de un tono de verde a otro.

Más tarde, el diamante se enfriará a la temperatura del helio líquido. Los investigadores del Laboratorio de Fotónica Cuántica, dirigidos por el físico Dirk Englund, del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), creen que, si controlan la estructura cristalina del diamante átomo por átomo, lo enfrían a temperaturas próximas al cero absoluto y aplican un campo magnético, podrán seleccionar las propiedades cuánticas de fotones y electrones con tal precisión que serán capaces de transmitir mensajes cifrados de tal manera que resulten imposibles de desencriptar.

Trusheim, investigador posdoctoral del laboratorio, es uno de los muchos científicos que intentan averiguar qué átomos incrustados en qué cristales y en qué condiciones les brindarán ese tipo de control. Expertos de todo el mundo están intentando dominar la naturaleza a nivel atómico y subatómico, hasta llegar al de los electrones o incluso de fracciones de electrones. Su propósito es descubrir los mecanismos que regulan las propiedades fundamentales de la materia y la energía, y controlarlas para crear ordenadores cuánticos o superconductores que funcionen a temperatura ambiente.

Ese intento se enfrenta a dos desafíos. Desde un punto de vista técnico, la dificultad es extrema. Algunos cristales, por ejemplo, deben producirse con una pureza del 99,99999999 por ciento en cámaras en las que se alcance un vacío mayor que el que reina en el espacio exterior. Y, desde un punto de vista fundamental, la clase de efectos cuánticos que los investigadores desean controlar —como el hecho de que una partícula pueda encontrarse en dos estados a la vez, como el gato de Schrödinger— solo se dan en electrones individuales; en nuestro mundo macroscópico, esa magia se desvanece. Así pues, quienes intentan manipular la materia a las escalas más pequeñas se enfrentan al reto de tensar al máximo los límites que imponen las leyes físicas fundamentales. El éxito que tengan determinará nuestras capacidades científicas y tecnológicas durante las próximas décadas.

EL SUEÑO DE UN ALQUIMISTA

LA MANIPULACIÓN DE LA MATERIA reside, en gran medida, en el control de los electrones. A fin de cuentas, su comportamiento en un material determina las propiedades de este como un todo, ya se trate de un metal, un aislante, un imán o cualquier otro. Algunos intentan modificar el comportamiento colectivo de los electrones con la finalidad de crear los llamados materiales sintéticos cuánticos. «Podremos transformar un aislante en metal, un semiconductor en superconductor o un material no magnético en uno magnético», aseguraba la física Eva Andrei, de la Universidad Rutgers, en una conferencia reciente. «Es el sueño de un alquimista hecho realidad.»

De ese sueño podrían derivarse avances reales. Por ejemplo, hace decenios que los investigadores intentan crear materiales superconductores a temperatura ambiente, lo que entre otras ventajas permitiría construir líneas de transporte de electricidad que no sufran pérdidas. En 1957, los físicos John Bardeen, Leon Cooper y John Robert Schrieffer demostraron que la superconductividad emerge cuando los electrones libres de un metal, como el aluminio, se agrupan y forman los denominados pares de Cooper; un hallazgo que les valió el premio Nobel en 1972. Aunque los electrones se encuentren relativamente separados, cada uno se combinará con otro de espín y momento opuestos. Y, al igual que una pareja que baila en una discoteca abarrotada, los movimientos de los electrones apareados permanecerán

coordinados entre sí aunque entre ellos se interpongan otros electrones.

Esa disposición permite que la corriente fluya sin resistencia y, por tanto, sin pérdidas de energía. La mayor parte de los superconductores prácticos desarrollados hasta la fecha han de enfriarse a temperaturas próximas al cero absoluto para que se establezca ese estado. No obstante, hace poco se ha descubierto que, al hacer incidir un láser de alta intensidad sobre un material, es posible conseguir que los electrones se agrupen en pares de Cooper, si bien solo durante un breve espacio de tiempo. Andrea Cavalleri, del Instituto Max Planck para la Estructura y la Dinámica de la Materia, en Hamburgo, y sus colaboradores han hallado indicios de superconductividad fotoinducida en metales y aislantes. Iluminar un aislante de la manera adecuada hace que sus átomos vibren y los electrones adopten momentáneamente un estado superconductor. «La sacudida debe efectuarse con gran violencia», explica David Hsieh, físico de la materia condensada del Instituto de Tecnología de California que usa la misma técnica para inducir efectos cuánticos poco comunes en otros materiales. «El campo eléctrico es fortísimo, pero se mantiene durante un tiempo tan corto que no genera demasiado calor.»

Para evitar que el láser vaporice el material, Hsieh emplea un pulso de unas decenas o cientos de femtosegundos (hay tantos femtosegundos en un segundo como segundos en 32 millones de años). Por desgracia, la superconductividad inducida de esta manera apenas dura un poco más. Por tanto, el reto consiste en lograr que el efecto dure lo suficiente para que resulte de utilidad. Con respecto a estas y otras investigaciones sobre materiales cuánticos, Hsieh apunta: «Lo que intentamos hacer es concebir compuestos en los que, incluso cuando se trate de una enorme cantidad de electrones, se mantengan esas rarezas cuánticas que de ordinario solo se dan en partículas individuales».

CÓDIGOS INQUEBRANTABLES

ES TAMBIÉN MEDIANTE el control de los electrones como Trusheim y Englund esperan crear una encriptación cuántica indescifrable. En su caso, el objetivo no consiste en alterar las propiedades de los materiales, sino en lograr que los efectos cuánticos de los electrones de sus diamantes se compartan con fotones que transporten la clave criptográfica. Alrededor de los centros de color de los diamantes del laboratorio de Englund se agitan electrones libres cuyos espines pueden medirse con un campo magnético intenso. Un espín alineado con el campo se designa como «1», y uno no alineado como «2», equivalentes al 1 y al 0 de un bit digital. «Se trata de una partícula cuántica, por lo que puede existir en ambos estados al mismo tiempo», explica Englund. Esta cualidad lo convierte en un bit cuántico, o qubit, que ofrece la posibilidad de efectuar múltiples cálculos de manera simultánea.

Es ahí donde entra en juego una curiosa propiedad conocida como entrelazamiento cuántico. Imagine una caja con una bola roja y otra azul. Sin mirar, usted toma una bola, la guarda en el bolsillo y sale a pasear por la ciudad. Al rato la extrae y descubre que es la roja. Inmediatamente, sabrá que la bola que se encuentra en la caja es la azul. Trasladadas al reino cuántico, este tipo de correlaciones entre objetos reciben el nombre de entrelazamiento, y permiten manipular la información de un modo que sería imposible de conseguir con medios puramente clásicos.

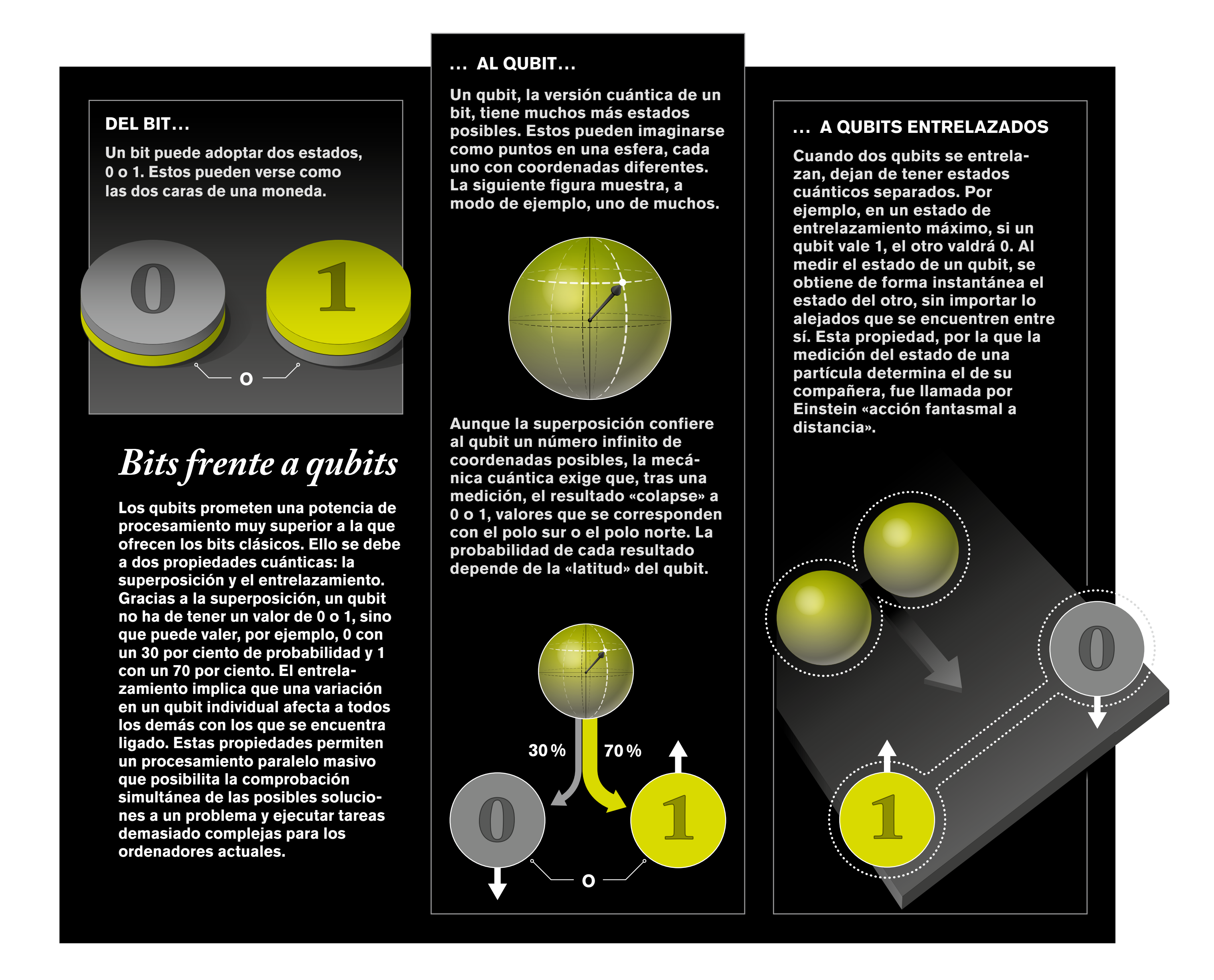
Los centros de color presentes en los diamantes de Englund transfieren los estados cuánticos de sus electrones a los fotones por medio del entrelazamiento, dando lugar a lo que Englund llama «qubits voladores». Como en las comunicaciones ópticas estándar, se puede transmitir un fotón a un receptor (en este caso, otro sitio vacante en la estructura del diamante) y transferir su estado cuántico a un nuevo electrón, de modo que ambos electrones queden correlacionados. La transmisión de estos bits entrelazados permite que dos personas compartan una clave criptográfica. «Cada una posee una cadena de ceros y unos, o espines orientados hacia arriba o hacia abajo, que a nivel local parecen aleatorias, pero son idénticas», explica Englund. Usar esa clave como factor de multiplicación para otros datos que se envíen garantiza una comunicación segura. Si se interceptara la transmisión, los emisores lo sabrían, ya que medir un estado cuántico lo modifica [*véase* «Los límites físicos de la privacidad», por Artur Ekert y Renato Renner; Investigación y Ciencia, enero de 2016].

Englund está experimentando con una red cuántica que envía fotones a través de fibra óptica entre su laboratorio, cerca de Harvard, y otra instalación, el Laboratorio Lincoln del MIT, en la cercana ciudad de Lexington. Pero se ha conseguido transmitir claves criptográficas cuánticas a distancias mayores. En 2017, un grupo chino anunció el envío de un código de este tipo desde un satélite en órbita hasta dos estaciones terrestres en el Tíbet, separadas entre sí por una distancia de 1200 kilómetros. La tasa de transferencia de bits de aquel experimento, muy baja aún, impedía una comunicación práctica: tan solo se detectó un par entrelazado por cada seis millones. La innovación que permitiría establecer redes terrestres de criptografía cuántica serían los «repetidores cuánticos»: dispositivos situados a lo largo de la red que irían generando de nuevo la señal sin alterar sus propiedades cuánticas. Englund se ha propuesto encontrar materiales con los defectos atómicos apropiados para conformar la pieza clave de tales repetidores.

El reto consiste en crear fotones entrelazados en cantidad suficiente para puedan transportar los datos. En un centro donde dos átomos de carbono se han sustituido por uno de nitrógeno, el electrón mantiene su estado de espín durante un tiempo largo (alrededor de un segundo), lo que aumenta las posibilidades de que el láser que lo atraviesa produzca un fotón entrelazado. No obstante, el átomo de nitrógeno no ocupa todo el espacio creado por los carbonos ausentes. Ese desajuste puede hacer que los fotones siguientes exhiban un color ligeramente distinto, por lo que ya no coincidirán entre sí. Otros átomos, como los de estaño, encajan bien y producen una longitud de onda estable; sin embargo, no mantienen su espín tanto tiempo.

EXTREMOS DIVIDIDOS

AUNQUE ENGLUND Y OTROS trabajan con electrones individuales, hay investigadores que intentan manipular fracciones de electrones. Esta línea de estudio se remonta a un experimento efectuado en 1982, año en que los Laboratorios Bell y el Laboratorio Nacional Lawrence Livermore acoplaron dos capas de cristales semiconductores diferentes, las enfriaron hasta cerca del cero absoluto y aplicaron un intenso campo magnético que atrapó los electrones en el plano de la interfase entre ambas láminas. Se generó así



Bits frente a qubits

Los qubits prometen una potencia de procesamiento muy superior a la que ofrecen los bits clásicos. Ello se debe a dos propiedades cuánticas: la superposición y el entrelazamiento. Gracias a la superposición, un qubit no ha de tener un valor de 0 o 1, sino que puede valer, por ejemplo, 0 con un 30 por ciento de probabilidad y 1 con un 70 por ciento. El entrelazamiento implica que una variación en un qubit individual afecta a todos los demás con los que se encuentra ligado. Estas propiedades permiten un procesamiento paralelo masivo que posibilita la comprobación simultánea de las posibles soluciones a un problema y ejecutar tareas demasiado complejas para los ordenadores actuales.

JEN CHRISTIANSEN

una especie de sopa cuántica en la que el movimiento de un electrón dado se veía afectado por las cargas de otros electrones. «No son realmente partículas individuales per se», explica Michael Manfra, que dirige el grupo de semiconductores cuánticos de la Universidad Purdue. «Cabe imaginárselo como un *ballet* en el que cada bailarín no solo da sus pasos, sino que también responde a los de su pareja y los demás bailarines.»

Lo extraño de esa conjunción es que puede tener cargas eléctricas fraccionarias. Un electrón constituye una unidad indivisible: no se puede cortar en tres partes. Sin embargo, es posible que un grupo de electrones en el estado correcto dé lugar a una cuasipartícula con una carga de un tercio. Mohammad Hafezi, físico del Instituto Cuántico Conjunto, un centro mixto de la Universidad de Maryland y el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de EE.UU, reproduce este efecto en grafeno superenfriado. Hace poco, ha demostrado que es posible manipular el movimiento de las cuasipartículas iluminando el grafeno con un láser. «Ahora pueden controlarse», explica. «Los instrumentos externos de los que disponemos, como el campo magnético o la luz, pueden graduarse para que aumente o disminuya su intensidad. Eso permite modificar la naturaleza de ese estado colectivo».

La manipulación de cuasipartículas permitiría crear un tipo especial de qubit conocido como qubit topológico. La topología es el área de las matemáticas que estudia qué propiedades de un cuerpo permanecen invariantes cuando este se retuerce o se deforma. El ejemplo típico es una rosquilla: si fuera perfectamente elástica, podría moldearse a partir de ella una taza de café sin alterar ningún rasgo esencial: el agujero de la rosquilla se convertiría en el asa de la taza. Sin embargo, para transformar una rosquilla en un objeto con dos agujeros, habría que abrir un hueco más, lo que modificaría su topología.

Un qubit topológico conserva sus propiedades incluso en condiciones cambiantes. En circunstancias normales, las partículas pierden sus superposiciones cuánticas —pierden su «coherencia»— cuando se ven perturbadas por factores del entorno, como una débil vibración causada por la agitación térmica. Sin embargo, construir un qubit con dos cuasipartículas separadas

una cierta distancia (por ejemplo, en los extremos opuestos de un nanohilo) es como dividir un electrón. Las dos «mitades» tendrían que experimentar exactamente la misma perturbación para que se produjese la pérdida de coherencia, y algo así es muy poco probable que ocurra por casualidad.

Esta propiedad hace que los qubits topológicos resulten muy atractivos para los ordenadores cuánticos. Gracias a que un qubit puede existir en una superposición de estados, las computadoras cuánticas deberían poder ejecutar tareas de cálculo que de otro modo resultarían irrealizables, como modelizar la física de la gran explosión que dio origen al universo. Manfra colabora en un proyecto de Microsoft que busca construir ordenadores cuánticos basados en qubits topológicos. Se han propuesto otras alternativas, quizá más sencillas. Google e IBM, por ejemplo, aspiran a desarrollar máquinas cuánticas basadas en hilos superenfriados o en átomos ionizados en una cámara de vacío y atrapados por láseres. El problema con estas técnicas es que son más sensibles a las perturbaciones externas que las basadas en qubits topológicos, especialmente cuando aumenta el número de qubits.

Así pues, los qubits topológicos podrían iniciar una revolución en nuestra capacidad para manipular las escalas más pequeñas. Sin embargo, hay un problema: aún no existen. Los investigadores se esfuerzan en construirlos a partir de partículas de Majorana, un tipo de partícula predicha en 1937 por el físico Ettore Majorana, que, al contrario de lo que ocurre con las partículas normales, sería idéntica a su antipartícula. Un electrón y su antipartícula, el positrón, tienen propiedades idénticas a excepción de la carga eléctrica. Una partícula de Majorana, sin embargo, puede ser idéntica a su antipartícula ya que su carga eléctrica es nula.

Ciertos estados colectivos de electrones y «huecos» (ausencias de electrones) pueden comportarse como partículas de Majorana. Y cabe la posibilidad de que estas, a su vez, se utilicen como qubits topológicos. En 2012, el físico Leo Kouwenhoven, de la Universidad Técnica de Delft, y sus colaboradores midieron lo que parecían ser partículas de Majorana en una red de nanohilos superconductores y semiconductores. Con todo, Sankar Das Sarma, del Centro de Teoría de la Materia Condensada de la Universidad de Maryland en College Park, sostiene que el único modo de demostrar que estas cuasipartículas realmente existen pasaría por fabricar un qubit topológico con ellas.

Otros son optimistas. «Creo sin ninguna duda que, tarde o temprano, se obtendrá un qubit topológico, solo porque es interesante hacerlo y alguien descubrirá cómo», asegura Steve Simon, físico teórico de materia condensada que trabaja en la Universidad de Oxford. «La gran pregunta es: ¿será así como consigamos construir un ordenador cuántico?»

Puede que aún falten años para disponer de ordenadores cuánticos, superconductores de alta temperatura y sistemas de encriptado cuántico inquebrantable. O puede que ese día no llegue nunca. Mientras tanto, los científicos seguirán luchando por dominar la naturaleza a escalas cada vez más pequeñas. Nadie sabe hasta dónde podrán llegar. Hasta ahora han alcanzado cotas sorprendentes. Pero, cuanto más descienden, mayor resistencia opone la naturaleza.

Neil Savage *es periodista científico.*

EPISTEMOLOGÍA

¿Cuánto podemos saber?

El alcance del método científico se ve restringido por las limitaciones de nuestros instrumentos y por la impenetrabilidad de algunas de las incógnitas más profundas de la naturaleza

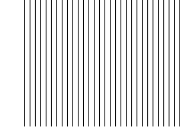
Marcelo Gleiser

«No es la naturaleza misma lo que observamos, sino la naturaleza expuesta a nuestro método de interrogación», escribió el físico alemán Werner Heisenberg, descubridor de la incertidumbre inherente a la física cuántica. A quienes consideren la ciencia como un camino directo hacia la verdad sobre el mundo, esta cita debe de parecerles sorprendente, quizás hasta ofensiva. ¿Acaso admitía Heisenberg que nuestras teorías científicas se hallan supeditadas a los observadores? ¿Significa que la verdad científica no es más que una gran ilusión?

Ante ello, la gente suele contraatacar con preguntas como: «¿Por qué vuelan los aviones o funcionan los antibióticos? ¿Por qué somos capaces de construir máquinas que procesan la información con tanta eficiencia?». Es innegable que tales innovaciones se basan en leyes que son independientes de nosotros. Hay un orden en el universo, el cual la ciencia revela de forma gradual.

Nadie pone en duda eso: hay orden en el universo y buena parte de la ciencia consiste en descubrir pautas de comportamiento (en los quarks, los mamíferos o las galaxias) que traducimos en leyes generales. Huimos de complicaciones innecesarias y nos centramos en las propiedades básicas del sistema estudiado. Luego construimos una narración descriptiva de cómo actúa el sistema, que en el mejor de los casos será, además, predictiva.

A menudo pasamos por alto que la metodología científica requiere interaccionar con el sistema objeto de estudio. Observamos su comportamiento, medimos sus propiedades y construimos modelos para comprenderlo. Y, para ello, necesitamos herramientas que se adentren más allá de nuestro alcance senso-



rial: en lo muy pequeño, lo muy rápido, lo muy lejano o lo inaccesible, como el interior del cerebro o el núcleo de la Tierra. No observamos la naturaleza misma, sino la naturaleza según la discernimos a través de los datos de nuestros instrumentos. Y, puesto que esas herramientas son limitadas, observamos con ojos necesariamente miopes. Vemos la naturaleza solo hasta cierto punto, y nuestra siempre cambiante visión científica refleja esta limitación fundamental.

Piense en la biología antes y después del microscopio y la secuenciación de genes, en la astronomía antes y después del telescopio, o en la física de partículas antes y después de los colisionadores. Ahora, al igual que en el siglo XVII, las teorías evolucionan conforme se transforman nuestras herramientas. Esta pauta constituye la seña de identidad de la ciencia.

Tales consideraciones se tienen a veces por derrotistas: «Si no podemos llegar al fondo de las cosas, ¿para qué molestarnos?». Semejante reacción está fuera de lugar. Entender las limitaciones de la aproximación científica al conocimiento no tiene nada de derrotista. La ciencia sigue siendo nuestra mejor arma para erigir consensos sobre el funcionamiento de la naturaleza. Lo que deberíamos corregir es esa sensación de triunfalismo: la creencia de que ningún interrogante escapa a la ciencia.

Hay en ciencia cuestiones incognoscibles: preguntas razonables a las que, a menos que se violen las leyes de la naturaleza actualmente aceptadas, no podremos dar respuesta. Un ejemplo es el multiverso, la conjetura de que nuestro universo no es más que uno entre muchos, cada uno con sus propias leyes físicas. De esos otros universos no podemos recibir señales, por lo que cualquier indicio de su existencia solo podría ser circunstancial.

Otros aspectos incognoscibles se reducen a tres cuestiones que atañen a los orígenes: el del universo, el de la vida y el de la consciencia. Las explicaciones científicas del comienzo del universo son incompletas porque dependen de un marco conceptual: la conservación de la energía, la relatividad, la física cuántica... ¿Por qué son esas leyes y no otras las que mueven los engranajes del cosmos?

De forma similar, a menos que demostremos que solo existen unas pocas rutas bioquímicas de lo inerte a lo vivo, no podremos saber con certeza cómo se originó la vida en la Tierra. En cuanto a la consciencia, el problema radica en el salto de lo material a lo subjetivo: de las neuronas a la experiencia de dolor o a la percepción del color rojo. Quizá en alguna máquina lo suficientemente compleja emerja un día una consciencia rudimentaria. Pero ¿cómo lo sabremos? ¿Cómo estableceremos de manera irrefutable que algo es consciente?

Paradójicamente, y aunque de manera imperfecta, damos sentido al mundo gracias a nuestra consciencia. ¿Podemos comprender por completo algo de lo que formamos parte? Al igual que la serpiente que se muerde su propia cola, nos hallamos atrapados en un círculo que empieza y termina con nuestra experiencia vivida del mundo. Resulta imposible separar nuestra descripción de la realidad del modo en que la experimentamos. Ese es el terreno en que se desarrolla el juego de la ciencia. Y, si respetamos sus reglas, solo podremos observar una parte de lo que se extiende más allá.

Marcelo Gleiser *es titular de la cátedra Appleton de filosofía natural y profesor de física y astronomía en el Dartmouth College, en EE.UU., donde dirige el Instituto de Programas Interdisciplinares. Es autor de* The island of knowledge *(2014).*



www.investigacionyciencia.es/Informeespecial/Lasgrandespreguntasdelaciencia

DESARROLLO

LA PLACENTA, EL PRIMER ÓRGANO DEL BEBÉ

Los estudios recientes indican que hace mucho más que transportar oxígeno y nutrientes al feto y eliminar los desechos y el dióxido de carbono

Adrian Erlebacher y Susan J. Fischer

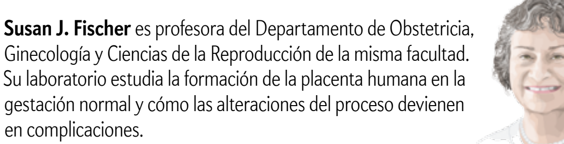




EN LA FOTOGRAFÍA, la placenta (*izquierda*) permanece unida al recién nacido, pero normalmente se expulsa minutos después del nacimiento del bebé, una vez cortado el cordón umbilical.



Adrian Erlebacher es profesor en el Departamento de Medicina de Laboratorio de la Facultad de Medicina de la Universidad de California en San Francisco. Dirige estudios con ratones para dilucidar las propiedades del útero gestante que le permiten tolerar la placenta a nivel inmunitario.



Susan J. Fischer es profesora del Departamento de Obstetricia, Ginecología y Ciencias de la Reproducción de la misma facultad. Su laboratorio estudia la formación de la placenta humana en la gestación normal y cómo las alteraciones del proceso devienen en complicaciones.

Los médicos creyeron durante décadas que el virus del Zika solo acarreaba consecuencias leves para el ser humano. Pero el brote acaecido en Brasil durante 2015 dejó patente que puede pasar de la madre al nonato con consecuencias dramáticas. En ocasiones el virus mata al feto y en otras le deja graves secuelas cerebrales, como la microcefalia (cabeza anormalmente pequeña). Es una incógnita cómo logra llegar hasta él, pues para ello debe atravesar la placenta, órgano que lo conecta con la madre y que impide el contagio maternofilial de otros virus semejantes transmitidos también por mosquitos, como los causantes del dengue o la fiebre amarilla.

Ante esa y otras incógnitas, en los últimos años la placenta ha pasado a ser el centro de atención de nuevas investigaciones. Como primer órgano surgido tras la concepción, además del más grande, es producto del embrión, no de la madre, y es responsable, entre otros cometidos, de suministrar los nutrientes y el oxígeno y de eliminar los desechos. A pesar de su cometido capital en la gestación, se puede afirmar que es el órgano menos conocido.

La vulnerabilidad de la placenta frente al virus del Zika no es el único misterio. Hace mucho que nos preguntamos cómo es posible que el sistema inmunitario de la madre no reconozca como extraños la placenta y el feto y no acabe atacándolos. Y es que no solo se inhibe, sino que contribuye al desarrollo y al funcionamiento del órgano placentario.

La investigación emprendida por nuestros laboratorios y por otros ha comenzado a dar respuestas fascinantes a esas preguntas. Ahora empezamos a saber que muchas de las complicaciones del embarazo —antes achacadas a problemas propios de la madre— realmente tienen su origen en defectos de la placenta o de su interacción con el útero. Es más, pequeñas variaciones en ella pueden afectar a la salud en momentos posteriores de la vida.

DESARROLLO ACELERADO

El halo de misterio que envuelve a la placenta es denso, pero hay dos cosas claras: la anatomía y las etapas básicas de su desarrollo. En el momento del alumbramiento, la placenta, con su forma de disco o torta, pesa alrededor de medio kilo y consta de dos caras claramente distintas: una permanece adosada a la pared del útero hasta el parto y semeja una esponja empapada en sangre, la otra, orientada hacia el bebé, alberga una maraña de vasos sanguíneos que confluyen en el cordón umbilical.

La placenta crece con suma rapidez porque debe asumir las funciones de otros órganos incipientes hasta que estos sean plenamente funcionales: metaboliza los nutrientes, como el hígado; intercambia el dióxido de carbono por oxígeno, como los pulmones; y elimina los desechos, como los riñones. Menos de una semana después de que el espermatozoide haya fecundado el óvulo, un grupo de células especializadas emerge en la superficie del embrión para formar el trofoblasto. Su primera misión, aparte de segregar hormonas que alerten al cuerpo materno de la presencia del nuevo ser, consiste en adentrarse profundamente en la pared uterina. El trofoblasto se divide con rapidez creando ramificaciones que invaden el útero. Una capa de células conforma el citotrofoblasto. Otra capa, esta de células fusionadas, el sincitiotrofoblasto, dará lugar a la superficie de la placenta. Poco a poco, el órgano adquiere su contorno discoidal, adherido a la pared uterina por estructuras ramificadas.

En la segunda y tercera semanas de gestación, esas ramificaciones comienzan a llenarse de células de soporte y vasos

EN SÍNTESIS

Que la gestación llegue a buen término depende del correcto desarrollo y funcionamiento de la placenta, un órgano peculiar que conecta a la vez que separa a la madre con el feto.

Se comienza a entender por qué el sistema inmunitario materno no rechaza al nonato como extraño y cómo algunos leucocitos maternos facilitan la formación de la placenta y su inserción en el útero.

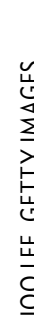
Conocer mejor los problemas que afectan a la interfase maternofetal, podría explicar algunas de las complicaciones más graves del embarazo, como el parto prematuro, el crecimiento intrauterino retardado y la preeclampsia.

Ahora se intenta averiguar por qué algunos patógenos, como el virus del Zika, logran atravesar la barrera placentaria, cuando otros no pueden.

PÁGINAS ANTERIORES: MONET MOUTRIE



A LAS CINCO SEMANAS, la placenta ya posee ramificaciones, pero permanece relativamente traslúcida porque aún no la irriga la sangre materna. Esta procede de un aborto; normalmente en esta fase envolvería por completo el embrión y el saco amniótico.



JOO LEE, GETTY IMAGES

feto. El citotrofoblasto también invade las venas uterinas y ello permite que la sangre retorne de la placenta a la madre, con lo que el circuito se cierra y el dióxido de carbono y otros desechos del feto se evacuan.

La sangre procedente de las arterias maternas baña la superficie de la placenta y queda separada de los vasos fetales solo por finas capas de células. En virtud de esa proximidad, el intercambio de gases, nutrientes y productos de desecho transcurre sin trabas. En los últimos años se ha descubierto que, además, la placenta vierte grandes cantidades de ADN fetal en la circulación materna, lo que posibilita estudios genéticos prenatales con muestras de sangre de la madre. Estas pruebas están sustituyendo rápidamente a las técnicas clásicas, más invasivas, como la amniocentesis o la biopsia coriónica.

INFLUENCIAS AMBIENTALES

Los genes del feto dirigen gran parte del desarrollo de la placenta, pero el microambiente que la rodea resulta asimismo determinante. En las dos últimas décadas hemos descubierto lo importante que es el intercambio entre las células maternas del tejido uterino con las ramificaciones placentarias invasoras, para que la gestación llegue a buen término. Allí donde el útero y la placenta se encuentran —en la interfase maternofetal— varios tipos de leucocitos, o glóbulos blancos, circulan transportados por la sangre materna. El trofoblasto del feto está en continuo contacto con estas y otras células uterinas para asegurar el correcto funcionamiento placentario.

El comportamiento de los leucocitos maternos resulta sorprendente. Con una dotación genética procedente en un 50 por ciento del padre, la placenta es por naturaleza extraña para la madre. ¿Cómo logra eludir el rechazo inmunitario y no ser reconocida y destruida como intrusa, tal y como ocurre con el trasplante de un órgano corriente si no se toman las debidas precauciones? Ahora se sabe que el sistema inmunitario materno experimenta cambios que le ayudan a tolerarla. También en el útero se dan ciertos procesos con idéntico fin. Datos obtenidos en roedores y publicados en 2012 por el otro autor de este artículo (Erlebacher) demuestran que los leucocitos, que en circunstancias normales rechazan los órganos trasplantados, son incapaces de acumularse en las paredes del útero cercanas a la placenta.

El cuerpo materno no solo tolera su presencia, sino que promueve el crecimiento de los tejidos fetales invasores. A comienzos de los años ochenta, se descubrió que en la cara uterina de la interfase maternofetal abunda un tipo de leucocito llamado linfocito citolítico natural (*natural killer cell*), lo que suele destruir las células tumorales y las células infectadas por virus. Pero en los noventa, investigadores dirigidos por B. Anne Croy, actualmente en la Universidad Queen, Ontario, hicieron un descubrimiento casi contradictorio: los linfocitos citolíticos naturales estimulan el desarrollo de la placenta, pues facilitan la remodelación de las arterias uterinas por el citotrofoblasto. Se sospecha que esos linfocitos segregan sustancias que aceleran la pérdida de las

Continúa en la página 76

sanguíneos. Para cuando la mujer se percata de que está embarazada, esta estructura madura, conocida como vellosidades coriónicas, ya está consolidada.

Es imperativo que la placenta alcance la plena funcionalidad en las primeras semanas de la gestación, por lo que su capacidad para canalizar el riego sanguíneo materno hacia sí resulta fundamental. Esto es posible gracias al viaje extraordinario que emprende el citotrofoblasto. Primero, las células se adosan a la superficie de la pared uterina, antes de internarse en él. Hace ya casi dos décadas, uno de los autores (Fischer) descubrió que, en este proceso, las células del citotrofoblasto se transforman mimetizándose con las células que revisten la luz interna (endotelio) de los vasos sanguíneos. Gracias a ello, el citotrofoblasto logra sortear las arterias maternas saturadas de oxígeno (*véase el recuadro* «La gestación en curso»). Una vez dentro, asciende por el revestimiento interno de los vasos sanguíneos, que reemplaza a su paso.

A consecuencia de esa sustitución de unas células por otras, las arterias del útero se dilatan y pierden su rigidez o tono normal, pues de lo contrario la sangre que circularía por ellas sería insuficiente. Al cabo del primer trimestre, las arterias se expanden en los espacios que separan las vellosidades coriónicas y la sangre materna comienza a afluir con profusión, y con ella, los nutrientes y el oxígeno precisos para el crecimiento del

La gestación en curso

El éxito de la gestación depende de procesos que ocurren en la interfase entre el cuerpo de la mujer gestante y el feto, donde la placenta (producto de células del embrión) se encuentra con la pared uterina. El correcto desarrollo y funcionamiento de esta interfase garantiza el aporte necesario de oxígeno, nutrientes y líquidos de la sangre materna al feto (el embrión se convierte en feto al término de la octava semana de gestación). Ello precisa la coordinación entre las células de la placenta, del útero y, según hallazgos recientes, del sistema inmunitario materno. La sangre materna comienza a irrigar la placenta entre 10 y 12 semanas después de la fecundación.

Placenta
Feto de 12 semanas
Área detallada
Interfase maternofetal
Cordón umbilical
Revestimiento uterino
Músculo uterino
Saco amniótico

Células deciduales que conforman el revestimiento uterino (*no todas las células se muestran a escala en la ilustración*)

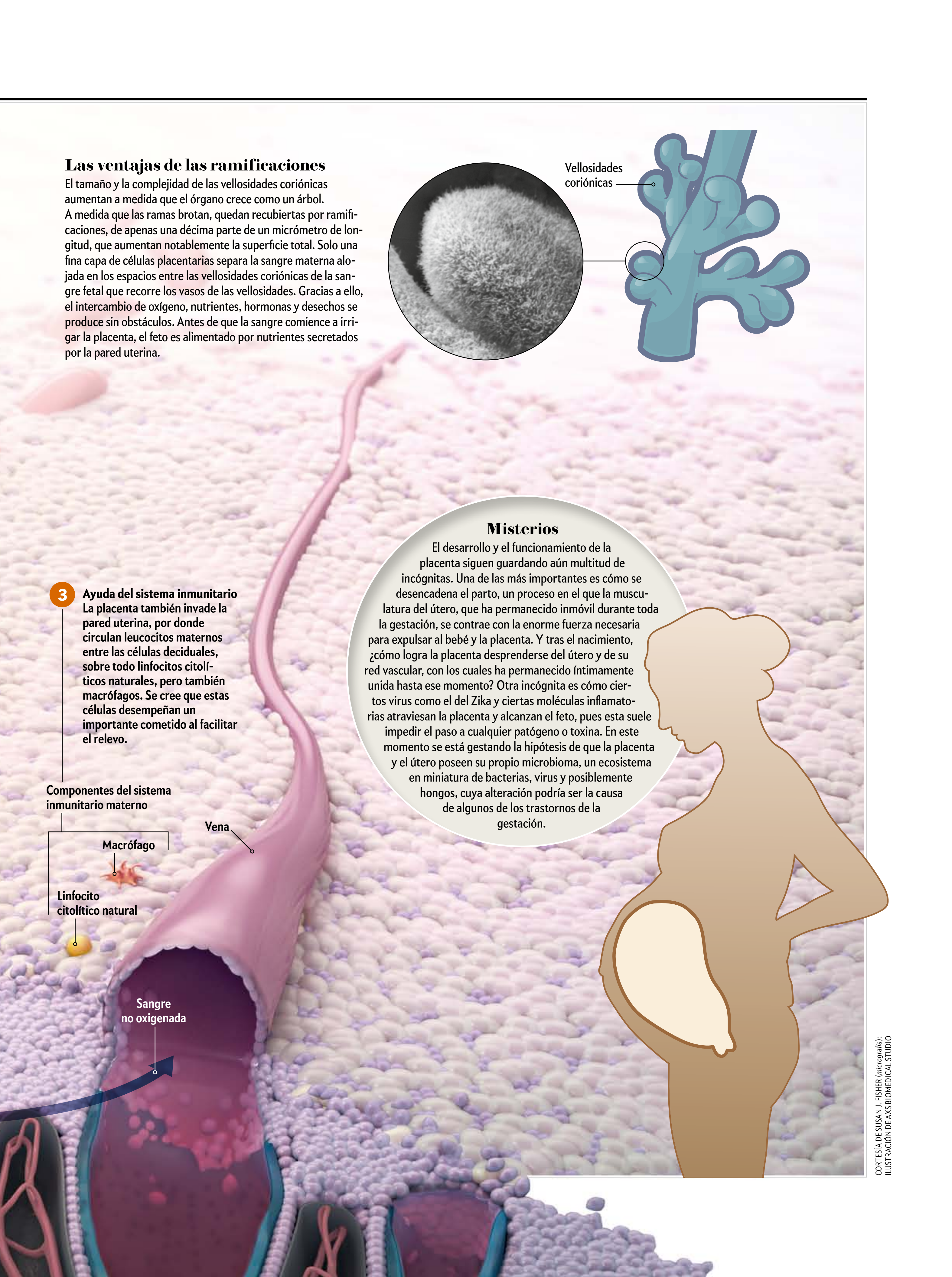
Arteria espiral

Invasión del útero

1 Remodelación arterial
La placenta alberga estructuras ramificadas llamadas vellosidades coriónicas, compuestas por un grupo de células que en conjunto se denominan trofoblasto. La superficie de las vellosidades está constituida por células del trofoblasto que están unidas entre sí y forman el sincitiotrofoblasto. Este, a su vez, reposa sobre una capa de células del trofoblasto que no se han fusionado, el citotrofoblasto. Algunas de ellas rompen el sincitiotrofoblasto para invadir las arterias espirales uterinas, donde sustituyen en parte las células de los vasos sanguíneos maternos.

2 Intercambio de sustancias
Las arterias maternas transformadas desembocan en los espacios intercalados entre las vellosidades (la mayoría se hallan flotando, más que ancladas a la pared uterina por el citotrofoblasto), de manera que bañan el sincitiotrofoblasto con sangre materna y facilitan el intercambio de sustancias y gases entre la madre y el feto. Las venas uterinas se llevan la sangre sin oxígeno de esos espacios.

Sangre materna oxigenada
Vellosidades coriónicas flotantes
Citotrofoblasto
Sincitiotrofoblasto
Trasvase de nutrientes y oxígeno
Vellosidades coriónicas ancladas con citotrofoblasto invasor
Trasvase de desechos, dióxido de carbono y hormonas
Sangre fetal



CORTESÍA DE SUSAN J. FISHER (*micrografía*); ILUSTRACIÓN DE AXS BIOMEDICAL STUDIO

Viene de la página 73
células que tapizan las arterias, lo cual facilita la irrupción de las células placentarias en los vasos maternos.

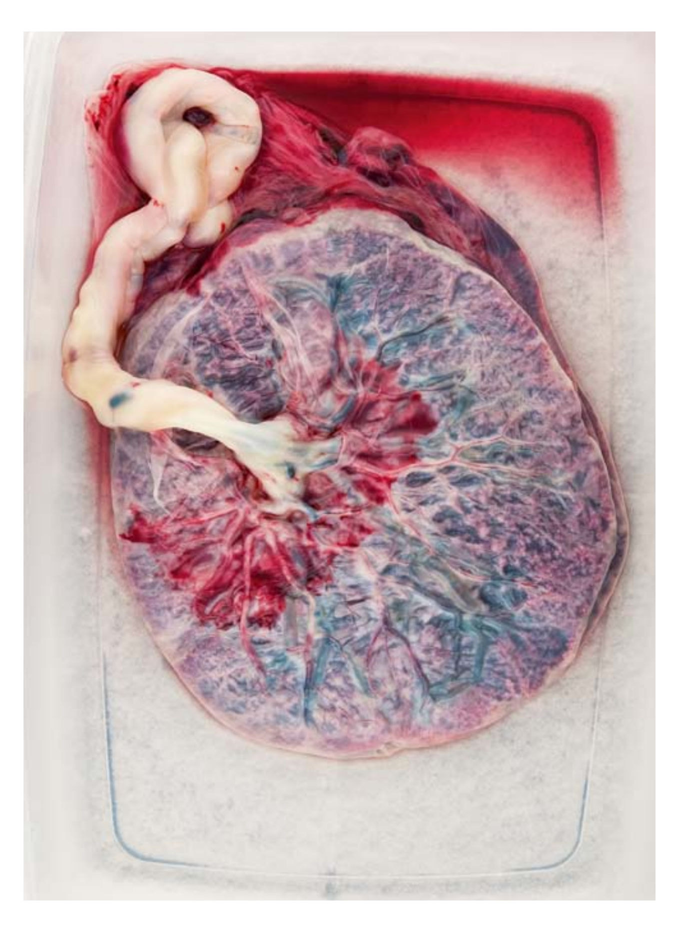
PROBLEMAS EN LA INTERFASE

Visto el ritmo vertiginoso con el que crece la placenta y la gran variedad de células que conforman tanto este órgano incipiente como la pared uterina, no sorprende que a veces se produzcan errores durante la formación de la interfase maternofetal. Tales fallos causan complicaciones durante la gestación, las más importantes de las cuales se conocen como grandes «síndromes obstétricos». Engloban el parto prematuro (antes de la semana 37), el crecimiento intrauterino retardado (feto más pequeño de lo esperado) y la preeclampsia (la madre experimenta súbitamente hipertensión arterial y sufre lesiones vasculares).

Estudios recientes de la placenta han contribuido a dilucidar los orígenes de algunas de esas patologías. Los médicos creían que la preeclampsia (conocida antes como toxemia) estaba motivada por el vertido de toxinas de la placenta en la sangre materna. Si bien los mecanismos exactos que causan este trastorno —que afecta al 8 por ciento de las primigestas— siguen siendo desconocidos, se sabe que la preeclampsia está vinculada con ciertas deformidades de la interfase maternofetal. Los expertos creen que el problema deriva de una invasión insuficiente de las arterias uterinas por parte del citotrofoblasto en la primera mitad del embarazo. El riego sanguíneo resulta entonces exiguo y el crecimiento del feto se retrasa. Con el tiempo, esta placenta anómala acaba segregando sustancias que resultan tóxicas para la madre, sobre todo para el aparato circulatorio, si bien no parecen ser el origen del problema, como se creía. Más bien serían la consecuencia. Si no se trata, la preeclampsia puede acarrear lesiones graves e incluso mortales para la madre y el bebé.

Sigue siendo un misterio lo que le sucede exactamente a la placenta en los casos de preeclampsia. El problema quizá radique en el citotrofoblasto, en alguna de las células maternas o en ambos. Curiosamente, es posible que la facultad de los linfocitos citolíticos naturales para detectar tejidos extraños sea en parte la culpable. Estudios dirigidos por Ashley Moffett, especialista en inmunología reproductiva de la Universidad de Cambridge, sugieren que, si la placenta y la madre se asemejan demasiado a nivel inmunitario, esos linfocitos tal vez no desempeñen plenamente su labor auxiliar en el reemplazo de las células maternas que revisten los vasos uterinos por las células placentarias.

La prematuridad —otro de los grandes síndromes obstétricos— genera gran preocupación porque su incidencia no cesa de crecer en el mundo. Según datos de los Centros para el Control y la Prevención de las Enfermedades (CDC), afecta a una de cada diez gestaciones en EE.UU. Si bien las infecciones uterinas pueden adelantar el parto, en muchos nacimientos pretérmino no se conoce con exactitud la causa. De hecho, hasta hoy se sigue sin saber qué desencadena el parto normal al término de la gestación. Es una de las preguntas irresolutas más importantes de la biología humana. Se asume que hay un «reloj» que marca la cuenta atrás de los 280 días que dura la gestación. Cuando suena la alarma, se desata una cascada inflamatoria en el seno del útero que es, probablemente, la causa inmediata de las contracciones y del parto. Pero, ¿dónde se halla el reloj?: ¿en el feto, en la placenta o en el útero? Es fácil suponer que el desarrollo defectuoso de la placenta en las fases iniciales pueda influir en los engranajes del reloj, pero no deja de ser mera especulación.



NORM BARKER

ESTE LADO DE LA PLACENTA, expuesto tras el nacimiento con el cordón umbilical, estaba cara al bebé durante la gestación. El otro, que recuerda a una esponja empapada en sangre, permanecía adosado a la pared del útero materno.

Los grandes síndromes obstétricos se solapan tanto en el cuadro clínico como en los mecanismos subyacentes. La penetración insuficiente del citotrofoblasto que se observa en la preeclampsia, por ejemplo, aparece asimismo en el crecimiento intrauterino retardado y en algunos casos de parto pretérmino. Conocer mejor los problemas de la interfase maternofetal y las complicaciones que desencadenan, mejoraría nuestra capacidad de intervención.

HUELLA DURADERA

Estas graves alteraciones de la gestación tienen una repercusión obvia en el recién nacido, desde trastornos tratables que precisan el ingreso en la unidad de cuidados intensivos hasta secuelas neurológicas permanentes. Los perjuicios del ambiente inadecuado para el desarrollo fetal no se limitan a la infancia; se manifiestan décadas después como enfermedades en el adulto. Se cree, pues, que los defectos placentarios pueden tener tan largo alcance.

A la idea de que las condiciones uterinas influyen en la salud del adulto se la ha denominado hipótesis del origen fetal. La propuso por primera vez en los años ochenta el epidemiólogo David Barker, con el fin de explicar la elevada incidencia de enfermedades cardiovasculares y diabetes en zonas desfavorecidas de Inglaterra. Barker descubrió que los adultos aquejados por esas enfermedades crónicas tenían más probabilidades de haber nacido con bajo peso, posible consecuencia de una nutrición in-

adecuada en el vientre materno. Algunos investigadores sospechan que la desnutrición o el fallo placentario podrían cambiar la manera en que los genes fetales dirigen su desarrollo durante la gestación, si bien se desconocen los entresijos del proceso. Algunos datos epidemiológicos apuntan a que los niños nacidos de madres que han contraído una infección vírica durante el embarazo, como la gripe, son más proclives a sufrir trastornos psiquiátricos y del neurodesarrollo, como autismo, trastorno bipolar o esquizofrenia.

Un estudio con ratones publicado en 2016 por el inmunólogo Dan R. Littman, de la Universidad de Nueva York, y por Jun R. Huh, de la Universidad Médica de Massachusetts, plantea que la infección gripal podría alterar el desarrollo cerebral de una forma inadvertida y solo afloraría años o décadas después. Es sabido que algunos agentes que actúan simulando infecciones víricas y que provocan inflamación en las hembras de ratón grávidas causan comportamientos similares al autismo en su descendencia. Littman, Huh y sus colaboradores han descubierto ese agente inflamatorio: se trata de la interleucina 17, segregada por las células del sistema inmunitario materno. Mediante complejas técnicas de imagen, el equipo demostró que esta proteína es la responsable directa de sutiles cambios estructurales en el cerebro de los ratones afectados.

Pero ¿cómo es posible que la IL-17 atraviese la placenta y alcance el cerebro del feto cuando otras moléculas de tamaño similar no pueden hacerlo? Una posibilidad es que, por algún motivo, la placenta capte la IL-17 del torrente sanguíneo materno, que pasaría a la circulación fetal y, de ahí, al cerebro. Otra es que algunas de las células inmunitarias de la madre que la producen sean las que atraviesen la placenta.

CRUZAR AL OTRO LADO

La pandemia del Zika ilustra de forma gráfica las consecuencias que puede tener un virus que infecta a la madre y consigue atravesar la placenta. Hoy en día tenemos más preguntas que respuestas sobre cómo causa los problemas de salud observados en los bebés afectados.

Puesto que el vínculo que la infección de la madre gestante guarda con las alteraciones en el feto se conoce desde hace tan poco, no es de extrañar que apenas se sepa cómo el virus se abre paso hasta él. Incluso la incidencia de los defectos congénitos es irregular y varía según la región. En un estudio con población estadounidense publicado el pasado enero en *JAMA*, el equipo conjunto de los servicios de salud pública y de los CDC solo detectó malformaciones en el 6 por ciento de los fetos y bebés de madres que habían sufrido una presunta infección por el virus del Zika. En cambio, un estudio brasileño publicado en septiembre del año pasado en *New England Journal of Medicine* plantea que casi la mitad de los fetos infectados podría sufrir algún tipo de daño. Es más, algunos bebés brasileños han acabado mostrando secuelas neurológicas tras ser dados por sanos en un principio. Puesto que los efectos dañinos del zika, sobre todo la microcefalia, parecen ser más prevalentes en Brasil que en cualquier otra parte, algunos investigadores postulan que quizá concurra allí un agente químico ambiental que debilite la placenta y la haga más vulnerable al virus. También se baraja la coinfección por otro microbio prevalente en ese país.

Otro interrogante es cómo alcanza el virus del Zika el feto. ¿Acaso se abre paso por la placenta desde la cara materna, infectando a cada célula con la que se encuentra, o es transportado por un tipo de célula, quizá del sistema inmunitario materno? Por otro lado, sabemos que algunos patógenos ascienden por la vagina hasta el útero y acceden así a los tejidos fetales. De lo que nadie duda es que una vez que el zika alcanza el feto, se hace fuerte. Los patólogos moleculares de los CDC han observado que el virus permanece en la placenta meses y continúa multiplicándose en el cerebro del niño después de nacer.

Por supuesto, no es el único patógeno que atraviesa la placenta y daña el feto. Se calcula que cada año nacen unos 100.000 bebés con rubéola congénita, causante de sordera, alteraciones oculares y cardiopatías, entre otros trastornos graves. El paludismo, el herpes y el ébola también pueden causar daños letales durante el embarazo. La manera exacta en que invaden el feto resta por determinar, pero todo apunta a que algunos son capaces de infectar el trofoblasto placentario, sobre todo al inicio de la gestación. Es probable que las defensas inmunitarias radicadas en la interfase maternofetal fallen a veces, sobre todo si reparamos en que el revestimiento uterino cumple dos fines, en esencia contradictorios. Por un lado, proteger al feto y a la placenta de las infecciones, y por el otro, evitar que el sistema inmunitario materno rechace y dañe a la placenta.

Sin duda, queda mucho por aprender sobre la placenta y la gestación. Por eso, el Instituto Nacional de Salud Infantil y Desarrollo Humano Eunice Kennedy Shriver emprendió hace tres años el Proyecto Placenta Humana, que busca conocer este órgano enigmático, que «no solo influye en la salud de la mujer y del feto durante la gestación, sino en la salud de ambos a lo largo de la vida». La agenda de investigación nacional debería priorizar el estudio de la placenta, a la altura de los esfuerzos por hallar una cura para el VIH, el cáncer y las enfermedades cardiovasculares. IyC

PARA SABER MÁS

The «Great Obstetrical Syndromes» are associated with disorders of deep placentation. Ivo Brosens et al. en *American Journal of Obstetrics and Gynecology*, vol. 204, n.º 3, págs. 193-201, marzo de 2011.

Immunology of the maternal-fetal interface. Adrian Erlebacher en *Annual Review of Immunology*, vol. 31, págs. 387-411, 2013.

Uterine NK cells: Active regulators at the maternal-fetal interface. Ashley Moffett y Francesco Colucci en *Journal of Clinical Investigation*, vol. 124, n.º 5, págs. 1872-1879, mayo de 2014.

Placenta: The forgotten organ. Emin Maltepe y Susan J. Fisher en *Annual Review of Cell and Developmental Biology*, vol. 31, págs. 523-552, 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

La placenta. Peter Beaconsfield et al. en *IyC*, octubre de 1980.

Inmunología del embarazo. G. Chaouat, en *Las defensas del organismo*, colección *Temas* de *IyC* n.º 25, 2001.





ARQUEOLOGÍA

LOS CAUTIVOS QUE CAMBIARON EL MUNDO

A lo largo de la historia, las personas sometidas a cautividad, en su mayoría mujeres y niños, fueron uno de los motores de la evolución de las sociedades modernas

Catherine M. Cameron

Ilustración de Katie Edwards

EN SÍNTESIS

Aunque suele considerarse que los miembros de las sociedades pequeñas se veían entre sí como iguales, en realidad la mayoría contaba con cierta cantidad de personas marginadas. Muchas de ellas eran capturadas en otras comunidades.

La historia mundial lleva largo tiempo ignorando la vida de estas personas raptadas. El análisis de los relatos de los primeros viajeros y otros informes indican que influyeron profundamente en las sociedades de sus captores.

Quienes estaban sujetos a cautividad crearon poder y riqueza, factores que ayudaron a sentar las bases de una transición social capital: la evolución hacia las sociedades de Estado modernas.

En 2014, cuando las tropas del ISIS invadieron los pueblos yazidi de Siria e Irak, mataron a los hombres y se llevaron a las mujeres y a las niñas. A algunas de solo 12 años de edad las convirtieron en «esposas», esclavas sexuales de los combatientes. Este horror no es nuevo: se trata de la misma pesadilla que llevan soportando las cautivas desde tiempos inmemoriales.



Catherine M. Cameron es arqueóloga de la Universidad de Colorado en Boulder. Investiga yacimientos arqueológicos del sudoeste de Estados Unidos. Lleva doce años estudiando la historia de las personas cautivas en las primeras sociedades pequeñas de todo el mundo.

Llevo una década analizando la cautividad en culturas prehistóricas e históricas. Soy arqueóloga y estudio sociedades pequeñas: grupos inferiores a 20.000 personas, emparentadas por consanguinidad o matrimonio y cuyos líderes poseen un poder relativamente limitado. La cautividad era omnipresente en estas sociedades: las crónicas de los primeros viajeros, las etnografías, los relatos de los propios cautivos y los textos de los arqueólogos hacen referencia a la cautividad en cada rincón del mundo, desde el norte de Europa hasta Sudamérica. Mi examen de estos escritos representa el primer intento de llevar a cabo un análisis transcultural del rapto y sus consecuencias.

El mundo que describen esos documentos contrasta con la imagen idealizada de unas comunidades pequeñas cuyos miembros se trataban como iguales. En la mayoría de estas sociedades había personas que no tenían acceso a los mismos recursos y beneficios que los demás. Algunas eran huérfanas, discapacitadas o delincuentes. Pero en su mayoría se trataba de cautivos procedentes de otros grupos, y podían constituir hasta el 25 por ciento de la población de algunas sociedades pequeñas. Como no tenían parientes, se convertían de inmediato en marginados. En muchos casos, los autóctonos ni siquiera los veían como humanos.

Aunque los cautivos constituían el estrato social más bajo de las sociedades a las que se incorporaban, influyeron en ellas de un modo muy profundo. Enseñaron a sus captores nuevas ideas, creencias y técnicas procedentes de sus comunidades de origen, y desempeñaron papeles clave en la creación de estatus, desigualdad y riqueza entre sus secuestradores. Ello podría haber sentado las bases para la aparición de una estructura social mucho más compleja: la sociedad de nivel estatal, donde una persona o un grupo posee gran poder y autoridad sobre una población de más de 20.000 personas, y en la que la pertenencia a la comunidad no se construye por lazos de parentesco, sino según la clase social o la residencia dentro de las fronteras del Estado-nación. Con toda la miseria que soportaron, los cautivos cambiaron el mundo.

TOMADOS POR LA FUERZA

La toma de cautivos se hacía por medio de guerras o incursiones. Durante su primer viaje a las Américas en 1492, Cristóbal Colón oyó hablar de la ferocidad de los kalinago (o caribes), de las Antillas menores. Documentos de los siglos xv y xvi revelan que viajaban cientos de kilómetros en sus canoas para atacar otras islas y robarles sus bienes y a su gente. Al regresar a casa, mataban en rituales a los varones adultos que capturaban. Emasculaban a los chicos y los usaban como esclavos hasta que alcanzaban la edad adulta, momento en que eran sacrificados. Las mujeres jóvenes ingresaban en la sociedad kalinago como concubinas o sirvientas de las esposas de sus captores. Los cazadores recolectores de la costa noroccidental de América del Norte hacían incursiones en busca de cautivos para esclavizarlos o intercambiarlos por bienes. Los relatos del siglo xix describen guerreros en flotas de canoas que atacaban a sus vecinos o recorrían distancias mayores para saquear. Se llevaban sobre todo a mujeres y niños, pero también a los hombres que no habían muerto en la batalla. Desde los siglos viii al xi, los vikingos saquearon desde el Atlántico Norte hasta el Mediterráneo, llevándose grandes cantidades de cautivos para convertirlos en esclavos o venderlos. Entre los siglos xii y xvi, las jefaturas de las costas de Filipinas enviaban flotas para cazar esclavos entre los grupos más pequeños de toda la región. Según la arqueóloga Laura Junker, de la Universidad de Illinois en Chicago, los saqueadores regresaban con cautivas para esclavizarlas o desposarlas. Las mujeres trabajaban en los campos o en la elaboración de cerámica o textiles, productos con los que comerciaban sus señores.

Los cautivos casi nunca lograban alcanzar un estatus igual al de los autóctonos. Cuando los guerreros regresaban, los futuros esclavos casi siempre sufrían un proceso que el sociólogo Orlando Patterson, de Harvard, denomina «muerte social»: eran despojados de su identidad natal y «renacían» como esclavos. Durante ese proceso, a menudo se forzaba a los esclavos a adoptar alguna marca visible de su servidumbre y recibían un nuevo «nombre de esclavo». Entre los conibo del este de Perú, un flequillo corto expresaba la condición de esclava. También reemplazaban las ropas tradicionales de quienes apresaban. Los kalinago golpeaban e insultaban a sus nuevos cautivos, les cortaban el pelo como signo de servidumbre y les quitaban el nombre, llamándolos simplemente «esclava» o «esclavo». Como al final los sacrificaban y se los comían, a los esclavos jóvenes varones los llamaban también «mi barbacoa».

Relatos de principios del siglo xix describen la traumática destrucción de la identidad social y cultural de quienes caían en la cautividad en el sudeste de Asia; entre ellos, un capitán de barco holandés, capturado por unos traficantes de esclavos iranun, de Filipinas. Contó que lo despojaron de sus ropas y lo amarraron de pies y manos al fondo del barco. Según el etnohistoriador James Warren, de la Universidad Murdoch, en Australia, estos piratas golpeaban a sus cautivos en codos y rodillas para evitar que se escaparan corriendo o nadando. Los cautivos, atados durante meses, mal alimentados y maltratados, acababan por perder toda esperanza de escapar.

En las sociedades de la costa noroeste de EE.UU., los cautivos no solo eran convertidos en esclavos sin posibilidad de llegar jamás a ser miembros de la sociedad de sus captores, sino que sus hijos compartían el mismo destino. Al igual que los esclavos africanos en el sur de EE.UU. o los esclavos de la antigua Roma, los hijos heredaban el estatus de sus padres.

AGENTES DE CAMBIO

Cabría pensar que los cautivos tuvieron pocas oportunidades de transmitir sus conocimientos a sus captores. Sin embargo, un análisis transcultural dibuja un cuadro muy distinto. Hoy


2

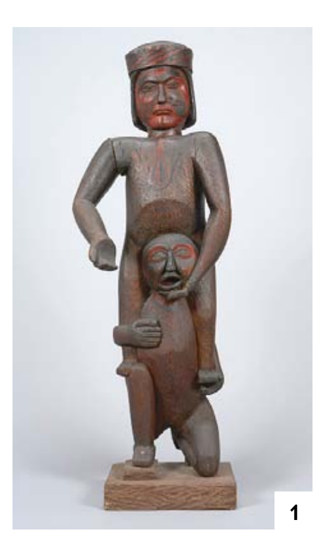

3

MUCHOS CAUTIVOS de sociedades pequeñas eran forzados a trabajar como esclavos, como se ve en esta escultura de madera de los indios de la costa noroeste de EE.UU. (*1*). A algunas mujeres, como Helena Valero, que en los años treinta del siglo XX fue secuestrada por los yanomamö del Amazonas (*2*), las convertían en esposas. La influencia de estos prisioneros en los grupos a los que se incorporaban queda patente en objetos como esta máscara iroquesa (*3*), usada en tradiciones medicinales que podrían haber introducido los cautivos hurón.

tendemos a pensar en las sociedades pequeñas como atemporales e invariables, pero lo cierto es que a menudo estaban ansiosas por aprender. Los cautivos aportaban oportunidades de progreso, y sus captores sacaron el máximo partido de ello.

Muchos relatos indican que a algunos de los secuestrados se los elegía por sus conocimientos técnicos. El armador de barcos inglés John Jewitt, capturado a principios del siglo XIX por los mowachaht, un grupo de la costa del noroeste de EE.UU., fue perdonado en un ataque letal porque al jefe le interesaban las armas metálicas que Jewitt sabía fabricar. El armador, que detalló en 1815 su calvario en unas memorias, también enseñó a sus captores a lavar la ropa sucia en vez de tirarla, aunque era él quien tenía que hacer la colada. Helena Valero, secuestrada de niña por los yanomamö del Amazonas en los años treinta del siglo XX, explicó que sus captores se enfurecieron cuando les dijo que no sabía fabricar herramientas de metal. Narró sus años con la tribu en un libro publicado en 1965, donde contaba lo siguiente: «Las mujeres decían "es una mujer blanca, tiene que saber, pero no quiere fabricar ropa, machetes ni cocinar para nosotros; ¡golpeadla!".». Sin embargo, su señor y otra de sus esposas la defendieron y sobrevivió. Las competencias metalúrgicas eran muy apreciadas entre las tribus germánicas del norte de Europa, que capturaban a los herreros romanos y, según parece, los ponían a trabajar. Los arqueólogos han descubierto en Dinamarca objetos metálicos de estilo romano, como estatuillas, cuernos para beber y armas, pero fabricados localmente.

Los secuestrados incluso llegaron a cambiar las prácticas religiosas de la sociedad de sus captores. En la costa noroccidental de América del Norte, los haida aprendieron de sus cautivos bella bella a celebrar el *potlach*, una reunión organizada para construir o reparar viviendas. Los habitantes de Ouidah, un puerto de esclavos de la costa occidental de África, practicaban diversos cultos vodun en el siglo XIX, algunos de los cuales fueron introducidos por esclavas raptadas en el interior del territorio. Y las tribus germánicas que atacaron el Imperio romano durante su declive aprendieron el cristianismo de sus cautivos.


1

Aunque los captores solían desdeñar a sus rehenes, creían a menudo que tenían poderes curativos. Algunas décadas después del viaje de Colón, el español Álvar Núñez Cabeza de Vaca y sus compañeros estaban explorando la costa del golfo de México cuando naufragaron y fueron secuestrados por grupos nativos de la actual Texas. Sus secuestradores se convencieron de que aquellos extranjeros sabían curar enfermedades, y Cabeza de Vaca y su grupo se hicieron muy conocidos por las ceremonias de curación que se inventaron. Cuando escaparon y siguieron rumbo a México, los muchos nativos con los que se encontraron a lo largo del trayecto les pedían que ejerciesen como sanadores. Del mismo modo, en el oeste norteamericano de mediados del siglo XIX, un jefe sioux oglala herido exigió a su cautiva, una joven pionera llamada Fanny Kelly, que lo atendiera porque creía que el contacto de las manos de una mujer blanca le curaría. Asimismo, se piensa que, en la región nororiental de Norteamérica, los cautivos hurones introdujeron la medicinal Sociedad de las Caras Falsas (en la que los curanderos llevaban máscaras de madera) entre sus captores iroqueses.

SÍMBOLOS DE ESTATUS

Quizás el descubrimiento más sorprendente de mi investigación sea que los cautivos fueron una potente fuente de poder social y político para sus secuestradores. En sociedades pequeñas, el poder social surgía del número de seguidores que el líder controlaba, en su mayoría parientes. Los cautivos aumentaban sobremanera la cifra de seguidores no parientes, lo que incrementaba el estatus de sus captores. Los rehenes, especialmente las mujeres en edad reproductiva, posibilitaban que los líderes, o los hombres que buscaban estatus, aumentasen el tamaño de su familia o el número de seguidores sin necesidad de pagar una dote a la familia de la novia. Y, por definición, los cautivos creaban desigualdad en las sociedades a las que se incorporaban. Que fuesen los miembros más menospreciados del grupo hacía que aumentara la categoría de todos los demás.

En la mayoría de las sociedades pequeñas que he estudiado, el prestigio de los hombres dependía de sus éxitos en la guerra,

MUSEO DE ANTROPOLOGÍA DE LA UNIVERSIDAD DE LA COLUMBIA BRITÁNICA (1); JOSE ANTONIO CARRERA MUNOZ (2); WERNER FORMAN, GETTY IMAGES (3)

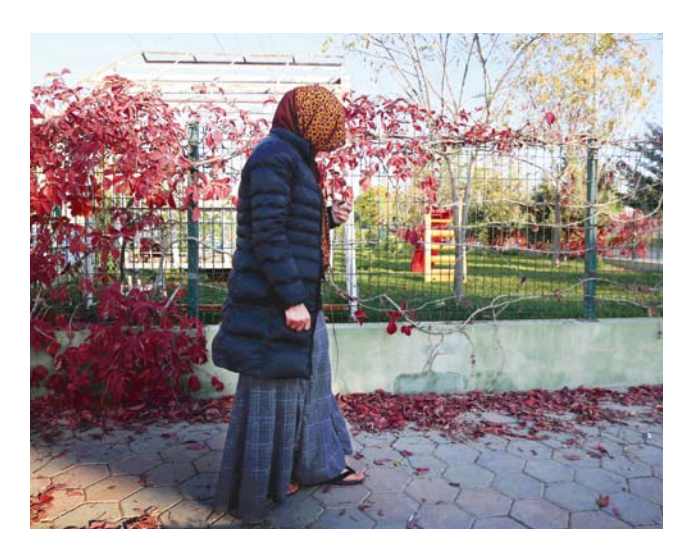
y los cautivos constituían la mejor prueba de la victoria. Entre los kalinago, la única manera de asegurarse un matrimonio provechoso dentro de una familia de alto rango pasaba por triunfar en la guerra, lo que significaba tomar cautivos. Los hombres jóvenes iroqueses de la región nororiental de Norteamérica no podían esperar convertirse en líderes o conseguir un matrimonio conveniente a menos que fueran guerreros victoriosos, lo que dependía, una vez más, de la toma de cautivos. En las sociedades del noreste norteamericano, los hombres usaban la «ceremonia de la *calumet*» (un ritual de creación de alianzas en el que las pipas sagradas, o *calumets*, desempeñaban un papel central) para presumir de su éxito como guerreros y captores. En ella, cada guerrero relataba las batallas en que había participado y describía a cada esclavo que había conseguido. En las jefaturas de Filipinas, entre los siglos XII y XVI, los guerreros que se hacían con más cautivos y un botín mayor conseguían un estatus más elevado. Aspiraban a emular los éxitos de los guerreros míticos, cuyos poderes sobrenaturales les permitían vencer a los enemigos y secuestrar a su gente.

Los dueños de esclavos también elevaban su estatus social demostrando públicamente su poder sobre ellos. La gran diferencia en las actividades cotidianas de los señores y los cautivos reforzaba su categoría relativa. Un estatus social elevado no solo requería siervos, sino una audiencia que fuera testigo de la dominación. Patterson explica que el culto a lo caballeresco del sur de EE.UU., basado en enfatizar el «honor» de los sureños, solo era posible porque los hombres blancos se comparaban a sí mismos con los esclavos, sin poder alguno y, según ellos, «sin honor» (con independencia de si ellos mismos poseían o no esclavos). En las sociedades pequeñas se desarrollaba una dinámica similar. Por ejemplo, los hombres prominentes de la costa noroeste estadounidense, apodados «títulos», alardeaban de su prestigio en la interacción diaria con sus esclavos. Los títulos solo se encargaban de las tareas administrativas, como organizar eventos ceremoniales, y casi nunca desempeñaban trabajo real, el cual se reservaba a los esclavos. Las esposas y las hijas de los títulos también evitaban trabajar. Los esclavos las seguían a todas partes: a buscar madera y agua, a cocinar, a transportar cargas y a cuidar de los niños.

Entre los conibo, los cautivos también podían trabajar como sirvientes domésticos de individuos o familias de alto rango, lo que elevaba aún más el estatus social de sus amos. Del mismo modo, los makú secuestrados por los tukano del este, quienes vivían en la cuenca del río Vaupés en Brasil y Colombia, se ocupaban de las necesidades personales de su señor y su esposa. Sujetaban el gran cigarro ceremonial de su amo cuando fumaba e incluso amamantaban a los bebés de sus señoras, según el antropólogo Fernando Santos Granero, del Instituto Smithsoniano de Investigaciones Tropicales de Panamá. Aun así, los tukano despreciaban a los makú: los hombres podían tomar a las makú como concubinas, pero jamás pensarían en casarse con ellas.

GENERADORES DE RIQUEZA

Algunos expertos han argumentado que los esclavos de las sociedades pequeñas solo eran símbolos de estatus sin un papel económico real. Para ellos, existía una gran diferencia entre este tipo de esclavitud y la que se produjo a gran escala, cuyo impacto económico es palpable en la historia reciente: los esclavos africanos produjeron la riqueza del sur de EE.UU., uno de los motores del desarrollo económico del país durante el siglo XIX. Sin embargo, los grupos que he estudiado sugieren que los cautivos de las sociedades antiguas más pequeñas fueron quienes comenzaron



ESTA MUJER YAZIDI se encontraba entre las miles que fueron tomadas como esclavas sexuales por el ISIS en 2014.

SAFIN HAMED, GETTY IMAGES

el proceso de creación de riqueza, estatus y desigualdad que presagiaría las consecuencias económicas de la esclavitud a gran escala en EE.UU., Roma y otros lugares.

Los líderes tenían que recompensar a sus seguidores voluntarios para mantener su lealtad, por lo que su poder estaba ligado a la capacidad que tuviesen de controlarlos y procurarles comida o bienes con los que comerciar. En las sociedades pequeñas, un aspirante a líder solía recurrir a sus parientes a la hora de crear los excedentes necesarios para ganarse a sus seguidores y conservarlos. Sin embargo, los parientes podían rechazar las demandas del aspirante a líder. Los cautivos indefensos, desde luego, no.

En la bibliografía abundan ejemplos precoloniales del impacto económico de los secuestrados. Consideremos las jefaturas del siglo XVI en el valle del Cauca colombiano, que libraban una guerra permanente. Según los primeros visitantes españoles —soldados y religiosos—, los vencedores tomaban cientos de cautivos. A algunos los sacrificaban, pero a otros muchos los mantenían como esclavos, lo que permitía a los amos expandir de manera significativa su producción de cereales. El salmón era un alimento básico para muchos grupos de la costa del noroeste norteamericano, pero estaba disponible solo en ciertas épocas del año, así que era necesario prepararlo para que se conservase. Aunque las tribus consideraban el procesado de salmón un trabajo de mujeres, no dudaron en poner a esclavos de los dos sexos a la tarea, lo que creó excedentes de salmón seco. En otros lugares de Norteamérica, como en las Grandes Llanuras durante el siglo previo a la llegada de los europeos, los hombres se enriquecían con la producción y comercio de vestimentas y pieles de búfalo, a modo de artículos de alta categoría. Producir pieles y prendas de vestir era una tarea de mujeres, muy laboriosa. La arqueóloga Judith Habicht-Mauche, de la Universidad de California en Santa Cruz, ha hallado pruebas de que los hombres de las llanuras capturaban mujeres de las aldeas de los indios pueblo para aumentar su número de esposas. Restos cerámicos elaborados en las llanuras con técnicas asociadas a la cultura pueblo señalan los movimientos de estas mujeres pueblo en los grupos de las llanuras. El trabajo cooperativo entre muchas esposas duplicaba la producción de pieles e incrementaba sobremanera la riqueza y el estatus de un hombre, afirma Habicht-Mauche.

Los recursos generados por los cautivos les permitieron a los jefes y aspirantes a líderes eludir las obligaciones recíprocas para con sus parientes y consolidar su poder social y económico. En Filipinas, las cautivas fabricaban comida, textiles o cerámica. Los jefes usaban el excedente de bienes para sufragar festines con el fin de atraer guerreros que les siguieran y pelearan por ellos, gracias a lo cual ampliaban sus ejércitos. Los aspirantes a jefes, entretanto, intercambiaban los bienes por todo el sudeste asiático para atesorar riqueza. Los conibo de Perú contaban con un medio similar para convertir en poder y estatus el excedente de riqueza generado por los cautivos: el denominado «festín competitivo». Según el arqueólogo Warren DeBoer, de la Universidad Municipal de Nueva York y experto en los conibo, para los hombres ambiciosos era importante tener múltiples esposas que los ayudaran con el festín. Tanto las esposas autóctonas como las cautivas cultivaban un alimento básico, la yuca, y elaboraban con ella la cerveza, atracción principal del festín competitivo. Cuantas más esposas tenía un hombre —y las redadas en aldeas pequeñas río arriba proporcionaban un suministro constante—, más cerveza se producía en su casa. Cuanta más cerveza era capaz de ofrecer, más grandioso era el festín que podía celebrar y mayor su categoría. Esta dinámica parece tener raíces profundas: el hallazgo de vasijas del primer milenio de nuestra era para elaborar, almacenar y beber cerveza sugiere que la celebración del festín competitivo y, con gran probabilidad, la presencia de mujeres cautivas que lo hacían posible, eran comunes entre los antepasados prehistóricos de los conibo y de muchas otras sociedades antiguas.

Los cautivos no solo producían riqueza; literalmente, la personificaban. Casi todas las sociedades pequeñas que he estudiado regalaban, intercambiaban o vendían a personas robadas. Como ocurría en el sistema esclavista del sur de EE.UU., los modestos cautivos eran bienes de gran prestigio, ligados a un estatus elevado y, a menudo, la posesión más valiosa de los hombres en las sociedades pequeñas. En la región nororiental de la Norteamérica de los siglos XVII y XVIII, los grupos indígenas utilizaban a los cautivos como regalo para crear alianzas o suavizar disputas. En la costa noroccidental, los diferentes grupos intercambiaban o vendían esclavos mediante rutas comerciales bien establecidas. En el valle del Cauca colombiano, los relatos de los exploradores de mediados del siglo XVI, los más antiguos conocidos, describen mercados de esclavos; una institución con toda probabilidad anterior al contacto europeo. En algunas partes del mundo, los esclavos incluso funcionaban como dinero. En la Irlanda altomedieval, por ejemplo, las esclavas representaban la unidad de valor más alta y se utilizaban como medio de pago.

DE LA TRIBU AL ESTADO

En vista de la repercusión que quienes padecían cautividad tenían en las culturas a las que se incorporaron, cabe concluir que desempeñaron un importante papel en una de las transiciones sociales fundamentales de la historia de la humanidad: la formación de sociedades estatales complejas. El arqueólogo Norman Yoffee, de la Universidad de Michigan, sostiene que las sociedades estatales no surgieron hasta que los cargos gubernamentales y socioeconómicos dejaron de estar ligados al parentesco. Y la mayoría de los arqueólogos y otros científicos sociales creen que los Estados fueron, al menos en parte, el resultado de que unas pocas personas crearan y controlaran el excedente de bienes. La toma de cautivos ayudó a los primeros grupos humanos a cumplir estas dos condiciones necesarias para la evolución de los Estados. Desde luego, los cautivos no fueron el único factor en la emergencia de los Estados: numerosas sociedades pequeñas de todo el mundo que también los tenían no experimentaron este cambio social tan drástico. Pero los cautivos fueron capturados (y aún lo son) para apuntalar el estatus social de hombres ambiciosos. Y, en mi opinión, ofrecieron a algunos de estos la oportunidad de acumular las cantidades de riqueza y poder necesarias para fundar los primeros Estados.

Si la captura de personas contribuyó a la formación de sociedades estatales, deberíamos encontrar signos de cautivos entre los restos de los primeros Estados. Y una de esas pruebas es precisamente la obtenida en uno de los lugares del sudoeste estadounidense donde he trabajado: el cañón del Chaco, en Nuevo México. La organización política del Chaco existió aproximadamente entre los años 800 y 1250 de nuestra era, y se considera la única sociedad estatal del sudoeste de los actuales Estados Unidos. El análisis de restos humanos de los alrededores revela que, en el período en que el Chaco tuvo el poder, el número de mujeres en su entorno era muy superior al de las épocas en las que no. Los enterramientos del propio cañón del Chaco contenían muchas mujeres de entre 15 y 25 años, lo que coincide con el sexo y la edad más comunes entre las personas cautivas. Asimismo, entre los restos humanos de una gran vivienda de estilo chaco, cerca del cañón, se hallaron mujeres con indicios de heridas cicatrizadas en la cabeza y otros traumatismos generalmente asociados con cautivos y otras personas marginadas y maltratadas. Otras pruebas de violencia en la región del Chaco, así como la tradición oral entre los descendientes actuales, también atestiguan la presencia de cautivos en la zona.

El Chaco no es el único ejemplo. El arqueólogo Peter Robertshaw, de la Universidad Estatal de California en San Bernardino, estudió el desarrollo de dos Estados de África oriental, Bunyoro y Buganda, a partir de mediados del siglo XV, en lo que hoy es el oeste de Uganda. Descubrió que muchas de las mujeres que trabajaban en los campos de banana o mijo habían sido capturadas y tratadas como mercancía. Robertshaw ha sugerido que la demanda de mano de obra femenina para la agricultura pudo haber sido el motor de la evolución sociopolítica de estas sociedades.

La idea de que los cautivos contribuyeron al cambio sociopolítico que en última instancia dio origen al mundo moderno no justifica de ningún modo el atroz maltrato que estas personas han sufrido en tiempos antiguos, históricos o recientes. Tres años después de que las fuerzas del ISIS arrasaran su territorio, algunas de las mujeres y niñas yazidi esclavizadas regresaron a casa. Miles de ellas siguieron en cautiverio. Espero fervientemente que muchas más cautivas yazidi se reúnan con sus familias. Las mujeres que se encontraron en situaciones parecidas a lo largo de milenios casi nunca abrigaron esa esperanza. Los arqueólogos podemos, al menos hasta cierto punto, reconocer su tragedia contando sus historias.

PARA SABER MÁS

The social psychology of modern slavery. Kevin Bales en *Scientific American*, abril de 2002.

The creation of inequality: How our prehistoric ancestors set the stage for monarchy, slavery, and empire. Kent Flannery y Joyce Marcus. Harvard University Press, 2012.

Captives: How stolen people changed the world. Catherine M. Cameron. University of Nebraska Press, 2016.

por H. Joachim Schlichting



H. Joachim Schlichting es exdirector del Instituto de Didáctica de la Física de la Universidad de Münster.

El misterio de la arena electrizante

En una tormenta de arena, los granos pueden adquirir carga eléctrica a través de colisiones mutuas y generar intensos campos eléctricos. Algunos detalles del proceso siguen siendo objeto de investigación

El ingeniero eléctrico Siemens subió en una ocasión a la pirámide de Keops y, ya a mitad de camino, no le gustaron las caras de sus acompañantes. Arriba hubo poco tiempo para disfrutar de las vistas, ya que los beduinos empuñaron sus pistolas y lo desvalijaron. Pero Siemens, que hacía tiempo que había notado que el aire del desierto estaba cargado de electricidad, arrojó con gran astucia su chubasquero de goma bajo sus pies, alzó su dedo empapado en el aire y lo bajó lentamente hasta la punta de la nariz del jeque, justo cuando lo tuvo delante. Una chispa saltó de la botella de Leiden viviente. Los beduinos huyeron gritando.

Así describía el filósofo Ernst Bloch (1885-1977) una vivencia del inventor e industrial Werner von Siemens (1816-1892). No parece probable que ocurriera exactamente así, pero, dejando a un lado los adornos literarios, el relato sí tiene un fondo verídico. Como el propio Siemens explicaba en *Poggendorff's Annalen der Physik und Chemie*, una importante revista científica de su tiempo: «Se podía notar un leve hormigueo, apenas perceptible, en la superficie de la piel del dedo que se oponía al viento. Solo podía interpretar este hecho, constatado por todos nosotros, como un fenómeno eléctrico y, en efecto, eso resultó ser».

Los campos eléctricos causados por las tormentas de arena, donde en ocasiones se producen fuertes descargas, son conocidos desde hace tiempo gracias a numerosos relatos de viajes. A través de los experimentos de Michael Faraday, coetáneo de Siemens, sabemos que en ellos intervienen tensiones de varios millones de voltios. Sin embargo, una pregunta fascinante y aún no del todo resuelta es cómo puede un material que en principio no es conductor, como la mundana y proverbialmente inerte arena, dar lugar a este tipo de fenómenos.

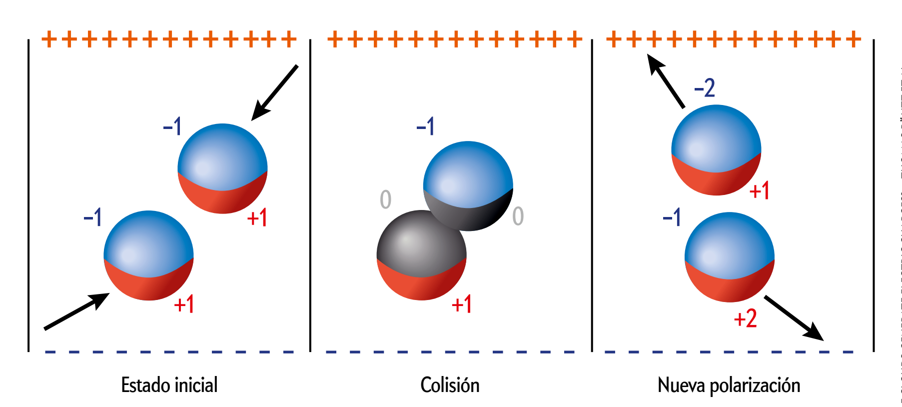
Polarización y carga

La electrización espontánea no se conoce solo por las tormentas del desierto. Las nubes de ceniza producidas en las erupciones volcánicas provocan a menudo fuertes tormentas, y las descargas eléctricas entre las partículas suspendidas en el aire pueden asimismo causar explosiones de polvo en la producción industrial.

La investigación científica se ocupó pronto de este fenómeno. Sin embargo, hasta la fecha, no entendemos todos los detalles de la electrización de los medios granulares, razón por la que hoy en día siguen apareciendo publicaciones sobre el tema. En particular, dos hechos bien documentados siguen suponiendo un reto para los investigadores: que un material aislante transporte grandes cantidades de carga eléctrica (a pesar de que, por definición, no poseen portadores de carga libres), y que dos cuerpos hechos del mismo material —como dos granos de arena— adquieran carga eléctrica por simple contacto mutuo.

En una tormenta en el desierto, la arena se introduce en la corriente de aire, es arrastrada, choca contra el suelo y catapulta nuevos granos hacia fuera, tras lo cual el proceso comienza de nuevo. Eso se traduce en numerosas colisiones que conducen a la electrización. Su desarrollo e intensidad dependen de varios factores.

Por un lado, ese bombardeo permanente ocurre en el seno de un campo eléctrico externo, ya que la superficie de la Tierra posee carga eléctrica negativa, y la atmósfera, positiva. Dicho campo desplaza los portadores presentes en el grano de arena, originalmente neutro y no conductor, de tal modo que aparece una carga positiva en la mitad inferior del objeto y una negativa en la superior.



POLARIZACIÓN EN LA ARENA: En presencia de un campo eléctrico externo (*cargas + y –*), las partículas no conductoras, como los granos de arena, pueden polarizarse. En una colisión solo intercambian portadores de carga las dos mitades en contacto. Después, el campo externo causa una nueva polarización que supera la inicial.

DE: «WHY DO PARTICLE CLOUDS GENERATE ELECTRIC CHARGES?», THOMAS PÄHTZ ET AL. EN *NATURE PHYSICS*, VOL. 6, PÁGS. 364-368, 2010.

GRANDES TORMENTAS: En el desierto, los vientos a menudo levantan nubes de arena y polvo hasta alturas considerables. Esta fotografía muestra una tormenta de arena en un poblado de Marruecos.

Por otro lado, la polarización existente puede aumentar cuando dos granos chocan. En tal caso, las mitades que colisionan intercambian sus cargas, de signo opuesto, y se tornan neutras. A continuación, el campo eléctrico externo vuelve a desplazar los portadores de carga. La partícula que ha adquirido carga positiva tiene ahora dos unidades de carga positiva en la mitad inferior y una unidad de carga negativa en la superior. Por su parte, la compañera presentará dos cargas negativas en la mitad superior y una positiva en la inferior. Por supuesto, en las situaciones reales se producen configuraciones y condiciones geométricas más complejas, aunque ello no cambia de manera sustancial los resultados de este modelo simple.

Dicha transferencia de carga puede ocurrir en cada colisión. Así pues, en última instancia, las cargas positivas de la arena son impulsadas hacia abajo y las negativas hacia arriba, de modo que la electrización aumenta con el número de impactos. Las cargas positivas cercanas a la superficie terrestre atraen a los portadores de carga negativa que hay en ella. De este modo, la concentración de estos aumenta localmente y el campo eléctrico entre el suelo y la atmósfera crece en la región donde tiene lugar la tormenta de arena. Eso provoca, a su vez, una polarización aún más pronunciada.



Tormentas y rayos

Con todo, el proceso que hemos descrito no puede continuar de manera indefinida. A fin de cuentas, las partículas con el mismo tipo de carga se repelen. Por ello, para seguir aproximándose y cargándose, los granos individuales necesitan más energía cinética, la cual crece con la velocidad media del viento.

Dado que la arena está continuamente aterrizando en el suelo y separándose de él, lo que tenemos es más bien un proceso periódico que conduce, en conjunto, a un estado de carga estacionario en la tormenta. Los investigadores aún no entienden con detalle los diferentes mecanismos que intervienen en él. En líneas generales, sin embargo, sí parece posible explicar la manera en que las fuertes tormentas de arena pueden producir grandes diferencias de carga eléctrica (diferencias que normalmente solo estamos acostumbrados a ver en las tormentas eléctricas) acompañadas de sus correspondientes y formidables fenómenos transitorios: los rayos.

Parece que, en su día, Siemens se vio en una situación así. El industrial alemán entendió rápidamente que, en un campo eléctrico intenso, uno puede construir algo parecido a un condensador con medios sencillos. Aislándose del suelo e impidiendo que la carga eléctrica fluyese de arriba abajo a través de su cuerpo, logró descargarla mediante una chispa sobre un hombre conectado a tierra. IyC

PARA SABER MÁS

Beschreibung ungewöhnlich starker elektrischer Erscheinungen auf der Cheops-Pyramide bei Cairo während des Wehens des Chamsin. Werner Siemens en *Poggendorff's Annalen der Physik und Chemie*, vol. 109, págs. 355-359, 1860.

Why do particle clouds generate electric charges? Thomas Pähtz et al. en *Nature Physics*, vol. 6, págs. 364-368, 2010.

EN NUESTRO ARCHIVO

Electrificación en las tormentas. Earle R. Williams en *IyC*, enero de 1989.

por Bartolo Luque

Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid, donde investiga en teoría de sistemas complejos. Su labor docente y divulgativa ha sido reconocida por uno de los premios de la Real Sociedad Española de Física y la Fundación BBVA 2017.



Ecuaciones de ciencia ficción

Una propuesta con 76 acertijos matemáticos para disfrutar bajo el sol

Este veraniego mes les propongo un reto: descubran el nombre de la película de ciencia ficción que se esconde tras cada una de las expresiones matemáticas, informáticas, químicas o físicas que se enumeran a continuación. Para ayudar en casos de desesperación, cada acertijo viene precedido por la fecha de estreno del film. Si consultan en Internet la lista de películas del género que se estrenaron ese año, el número de posibilidades se reduce de manera drástica y la solución se torna evidente.

Algunos acertijos deben leerse como jeroglíficos, mientras que otros aportan una idea general que remite a la película. La mayor parte de las soluciones son películas de ciencia ficción (excepto una de fantasía) y unas pocas series muy populares. En casi todos los casos, el acertijo debe interpretarse en castellano y codifica el título en castellano, aunque en unos pocos se juega con términos sencillos en inglés, y en dos hemos empleado lenguas alienígenas.

Espero que las soluciones les arranquen alguna sonrisa, espoleen su curiosidad matemático-científica y les animen a disfrutar de alguna de estas películas. Las soluciones, en el próximo número.

1902: 384.402 km

1925: $P(\text{ganar } \oplus) = 0$

1927: 1000 mm $\{P(z), Q(z), R(z), \ldots\}$

1931: $F\big(\text{rank}(mc^2 - i)\big)$

1933: $k \in \mathcal{G}, k_0(n^g)$

1951: Klaatu barada nikto

1953: $P\big(\text{paz} \,|\, \oplus, ♂\big) = 0$

1954: 111.440 km

1956: $\frac{T^2}{a^3}(M + m) \neq \frac{4\pi^2}{G}$

1957: $\text{hombre} = \lim_{t\to\infty} e^{-t}$

1959a: $\mathbb{R}^{¿?}$

1959b: 6371 km

1959c: $(\Pi\colon Ax + By + Cz = 0)\ 9$

1960: $M = (Q, \Sigma, \Gamma, s, b, F, \delta); M(t)$

1962: $\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial t} = -\frac{\partial H}{\partial \mathbf{q}}\ ;\ \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} = \frac{\partial H}{\partial \mathbf{p}}\ ;\ H = \text{naranja}$

1965: $L = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial H}{\partial p_i} \frac{\partial}{\partial q^i} - \frac{\partial H}{\partial q^i} \frac{\partial}{\partial p_i} \right); \text{Liou} = \alpha$

1966a: $^{\star}[\text{tr}(E^k)]$

1966b: 232,78 ºC

1968: $(2^{11} - p_{15})$

1971: $\left(\frac{PV}{nR}\right)\left(-\sum_{i=1}^{\infty} p_i \log p_i\right) X = 1138$

1973: $t = \lim_{\text{destino}\to\text{nosotros}} F(\text{destino})$

1975: $\{f$ continua en $[a,b]$; derivable en (a,b); $f(a)=f(b) \Rightarrow \exists c \in (a,b)\colon f'(c)=0\} + r + B(a,r)$

1977: [illegible]

1978: 3, 5, 11, 17, 31, 41, 59, 67, 83, 109, 127, 157, 179, 191, 211, 241, 277, 283, 331, 353, 367, 401, 431, 461, 509, 547, 563, 587, 599, 617, 709, 739, 773, 797, 859, 877, 919, 967, 991, ...

1979: 1, ~~2~~, ~~3~~, ~~4~~, ~~5~~, ~~6~~, ~~7~~; 8 = ¿gato?

1980: ⊕(sequence *A*007770 in the OEIS)

1981a: 0 Pa = 0 mmHg

1981b: Hg, Pb, Cd, As

1982a: $e^- - Lc$

1982b: 01000010 01101100 01100001 01100100 01100101 00100000 01010010 01110101 01101110 01101110 01100101 01110010

1982c: $x \in$ [XV, XVI]

1984a: $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{5 \cdot 10^4}{2^n + 6^n + 19^n}$

1984b: $D = 3474$ km; $T = 29{,}53$ d $\times$ 24 h/d $= 708{,}72$ h; $v = \frac{\pi D}{T} = 15{,}4$ km/h

1985a: $\sum_{t=0}^{\infty} \frac{t^n}{n!}$

1985b: $B_r(a) = \frac{\text{zillion}}{\text{Li}(x) \cdot o(n)}$

1985c: g: futuro → pasado ; $y = g(t)$; $t = g^{-1}(y)$

1987: $\begin{cases} \frac{dx}{dt} = x(a_1 - b_1 y) \\ \frac{dy}{dt} = -y(a_2 - b_2 x) \end{cases}$

1988a: $\left|\frac{d\mathbf{r}}{dt}\right| = 11{,}2$ km/s

1988b: $\frac{2\sqrt{2}}{9801} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(4k)!\,(1103+26.390k)}{(k!)^4\, 396^{4k}}$

1989:

```
Plot[{With[{w = 3*Sqrt[1 - (x/7)^2], l = (6/7)*Sqrt[10] +
(3 + x)/2 - (3/7)*Sqrt[10]*Sqrt[4 - (x + 1)^2], h = (1/2)
*(3*(Abs[x - 1/2] + Abs[x + 1/2] + 6) - 11*(Abs[x - 3/4] +
Abs[x + 3/4])), r = (6/7)*Sqrt[10] + (3 - x)/2 - (3/7) *Sqrt[10]
*Sqrt[4 - (x - 1)^2]}, w + (l - w)*UnitStep[x + 3] + (h - l)
*UnitStep[x + 1] + (r - h)*UnitStep[x - 1] + (w - r)*UnitStep
[x - 3]], (1/2)*(3*Sqrt[1 - (x/7)^2] + Sqrt[1 - (Abs[Abs[x] - 2]
- 1)^2] + Abs[x/2] - ((3*Sqrt[33] - 7)/112)*x^2 - 3)*((x + 4)
/Abs[x + 4] - (x - 4)/Abs[x - 4]) - 3*Sqrt[1 - (x/7)^2]}, {x, -7, 7},
AspectRatio -> Automatic, Axes -> None, Frame ->
True, PlotStyle -> GrayLevel[0]]
```

1993: $t <$ Bill Murray $< t$

1995: $\sum_{i=1}^{12} x_i^2\, y_i^3$

1996: $P(\text{lunes} \cap \text{martes}) = P(\text{lunes}) \cdot P(\text{martes})$

1997a: $\{a_n\}$; a_5

1997b: $r_s = \frac{2GM}{c^2}$

1997c: x^3

1997d: *GATTACA*

1997e: $N = R_* \cdot f_p \cdot n_e \cdot f_l \cdot f_i \cdot f_c \cdot L$

1997f: -- 00

1998: $x^2 + y^2 + z^2 = R^2$

1999a: $\lfloor 13 \rfloor$

1999b: $\exists nZ$

1999c: $\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$

2001a: $\sqrt{-A^2}$

2001b: $(l \vee d)$ $\{(\mathbb{Z},+,\cdot), \mathbb{R}[x], \mathbb{Q}(\sqrt{5}) \ldots\}$

2002a: $A\sin(\pi t)$; $B\cos(2\pi T)$; $C\sin(2\pi t + \delta)$ ...

2002b: *FBSKHU*

2002c: Min$\{x : x \in$ *Rep. Math. Phys.*$\}$

2003a: $\begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}$

2003b: $\ker(L) = \{\mathbf{v} \in V \mid L(\mathbf{v}) = \mathbf{0}\}$

2004a: $(2^{77.232.917} - 1)\ \dfrac{L}{2\pi}$

2004b: $-x = \dfrac{1}{x}$; $xR_0b_0^{(t)}$

2005: 42

2006a: 5

2006b: $-273{,}15$ °C

2007: $F(k) = \int f(x)e^{-ikx}dx$; $F(s) = \int f(t)e^{-st}dt$;
$M(s) = \int f(x)x^{-s-1}dx$ ...

2008: $W(A \cup A^c) \cdot \lim_{n\to\infty}\left(1+\dfrac{1}{n}\right)^n$

2009: $1{,}62$ m/s^2

2010a: $(0{,}0)$

2010b: $x(t+1) = \begin{cases} x(t) + \text{dead}, & p = 1/2 \\ x(t) - \text{dead}, & 1-p = 1/2 \end{cases}$

2011a: $\left[\int_{C^+}(Pdx + Qdy) = \iint_D \left(\dfrac{\partial Q}{\partial x} - \dfrac{\partial P}{\partial y}\right)dA\right] h\nu$

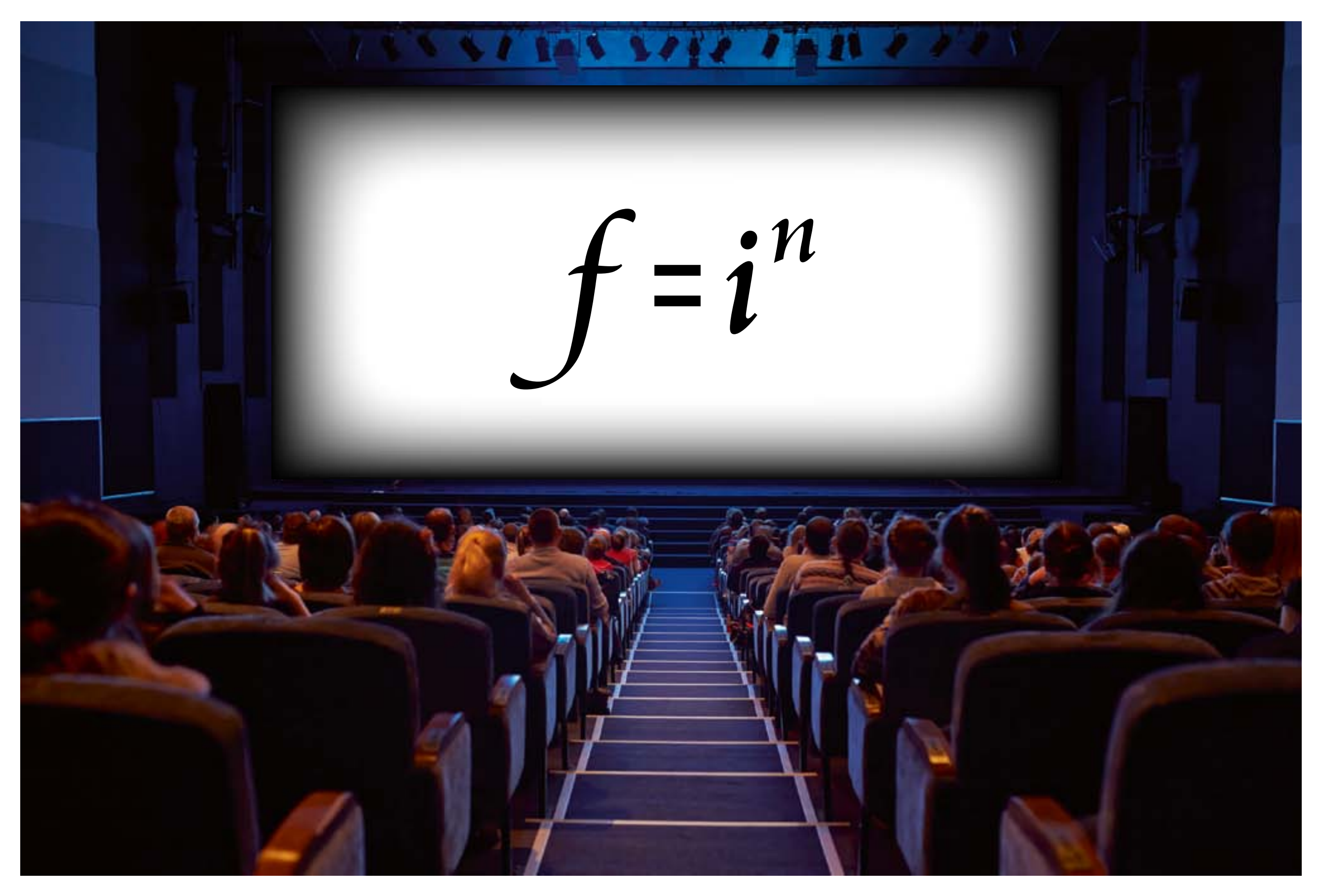
2011b:
```
with Text_lo; use Text_lo;
procedure película is
begin
put ("Soy el nombre de la película");
end película;
```

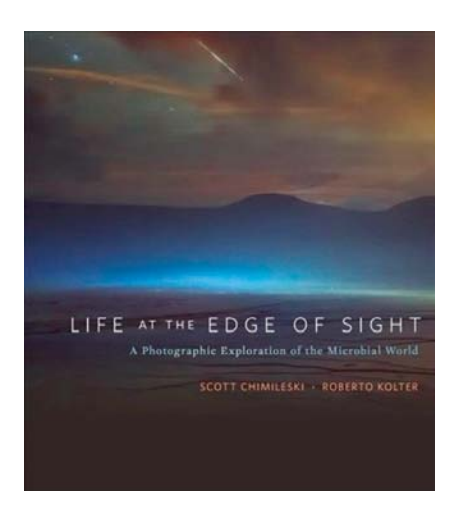
2013: $G\,\dfrac{m_1 m_2}{r^2}$

2014: $\{(x,y): 1 < x^{2/3} + y^{2/3} < 2\}$

2017: $[\text{rang}(A)]^n$

2018: $\exists!\,H(a_n)$





LIFE AT THE EDGE OF SIGHT
A PHOTOGRAPHIC EXPLORATION
OF THE MICROBIAL WORLD

Scott Chimileski y Roberto Kolter
Harvard University Press, 2017

La vida oculta

Un espectacular viaje visual al mundo de los organismos más prolíficos de la Tierra

De los casi 4000 millones de años de historia de la vida en el planeta, 3000 millones de ellos han estado dominados por los microorganismos. Estos diminutos seres fabrican fármacos, filtran aguas residuales y limpian la contaminación. Confieren al queso su sabor, su aroma al vino y su miga al pan. *Life at the edge of sight* es un álbum espléndido, una extraordinaria exploración visual de los habitantes de un mundo invisible que nos ofrece magníficas instantáneas de los organismos más prolíficos de la Tierra. En las rocas, el suelo, el aire, los estanques y los océanos, la vida está dominada por criaturas que los humanos no podemos observar. Los microorganismos medran por doquier, de los jardines a la cocina y en los entornos más extremos del planeta: bajo el hielo polar, en los respiraderos hidrotermales de los suelos oceánicos, en los manantiales ácidos. Y la investigación avanza.

En efecto, ha persistido irresuelta la cuestión de si los microorganismos recogidos en los entornos más áridos de la Tierra, que parecen medrar en condiciones tan extremas, se encuentran muertos o son vestigios moribundos de células viables depositadas fortuitamente por procesos atmosféricos. A partir de distintos tipos de pruebas, en marzo de 2018 se comprobó que hay comunidades microbianas indígenas y temporalmente activas incluso en los suelos hiperáridos del desierto chileno de Atacama. Siguiendo episodios rarísimos de precipitación en las zonas más secas del desierto, donde la lluvia se da con la cadencia de un episodio por década, los investigadores han detectado actividad biológica. Con esa investigación se extiende el abanico de entornos hiperáridos temporalmente habitables para la vida terrestre, que por extensión se aplica también a otros cuerpos planetarios, como Marte.

Usando técnicas de frontera, Scott Chimileski y Roberto Kolter ofrecen a los lectores un recorrido por las hazañas de los microorganismos, cuyo estudio ha arrojado luz sobre el origen de la vida en la Tierra y la posibilidad de vida en otros mundos, descerrajando mecanismos evolutivos y ayudando a explicar el funcionamiento de ecosistemas complejos. Un solo gramo de suelo rebosa miles de millones de ellos. Su diversidad genética es igualmente impresionante; de hecho, deja pequeña a la que contemplamos en los reinos vegetal y animal: existe mayor biodiversidad microbiana en una sola fronda de lenteja de agua flotante en un canal de Delft que la asociada a las plantas y animales de las pluviselvas tropicales. El mundo microbiano es el primigenio, siempre cambiante, enterrado en fósiles y movido por reacciones celulares que operan en fracciones de segundo. El resto de los organismos ha evolucionado en el seno de ese universo microbiano, produciendo unas simbiosis benéficas e intrincadas.

La disciplina de la microbiología tiene una historia relativamente corta. Hubo que esperar al siglo XVII para que el holandés Antonie van Leeuwenhoek abriera las puertas a un universo desconocido en el que medraban seres diminutos e inobservables a simple vista. Van Leeuwenhoek construyó cientos de microscopios. Algunos fueron acuáticos, para examinar las aguas de estanques y charcas locales. Fue el primero en ver bacterias, hematocitos, levaduras y espermatozoides. Una famosa ilustración, fechada el 17 de septiembre de 1683, nos muestra bacilos y cocos raspados de la placa de sus dientes. Los llamó «animálculos» [*véase* «Las primeras observaciones», por Brian J. Ford; Investigación y Ciencia, junio de 1998].

Dos siglos después, las bases de la vida microscópica quedaron al descubierto merced a los trabajos de tres pioneros de la disciplina: Louis Pasteur, Martinus Beijerinck y Serguéi Vinogradski. Pasteur desarrolló las técnicas de esterilización y determinó que la fermentación alcohólica implicada en la producción de vino se debía a la acción de la levadura de la cerveza. Beijerinck y Vinogradski descubrieron que los microorganismos desempeñaban un papel en el ciclo global del nitrógeno, desde el gas atmosférico inerte hasta sus formas nutricionales de amonio y nitrato. Los tres microbiólogos se percataron de que la actividad microbiana repercutía en el entorno y de que aquella recibía la influencia de este.

Resulta difícil sobrevalorar el peso de Robert Koch en la ciencia y la medicina del siglo XX. Ideó técnicas para obtener cultivos puros, donde solo había una especie microbiana. Ello le permitió demostrar que ciertas especies causaban ciertas enfermedades. Tras aislar el microorganismo a partir de animales enfermos y hacerlo crecer en un cultivo puro, reinfectó animales sanos y observó el desarrollo de la misma enfermedad. Koch dictó la ley de oro al definir un agente causal de una infección dada, una ley que ha resistido el paso del tiempo y que aportó una nueva forma de mirar a los microorganismos.

El advenimiento de la biología molecular en los años cincuenta del siglo pasado cambió de raíz la forma en que dibujamos el árbol de la vida. El dogma central dejaba de apoyarse en la morfología para fundarse en la genética: las secuencias de ADN se transcriben en secuencias de ARN, que se traducen en proteínas. Más tarde, Carl Woese y George Fox utilizaron la información genética para determinar las relaciones filogenéticas entre organismos.

Con un artículo publicado en 1977 y otro de Woese aparecido en 1990, su obra sobre los genes de ARN ribosómico reelaboró el árbol aceptado de la vida, el sistema de los cinco grandes reinos, en tres dominios principales: bacterias (microorganismos unicelulares que carecen de núcleo y de orgánulos diferenciados), arqueas (similares en apariencia y simplicidad a las bacterias, aunque con una organización molecular muy distinta), y eucariotas (todos los organismos cuyas

células poseen un núcleo diferenciado; es decir, el resto) [*véase* «Archibacterias», por Carl Woese; Investigación y Ciencia, agosto de 1981]. La vida sobre la Tierra, mostraba el modelo de Woese, es predominantemente microbiana. De hecho, la diversidad microbiana alcanza tal magnitud que los científicos encuentran dificultades para calcular su tamaño real. Algunas estimaciones sitúan el número de especies microbianas en el orden de los miles de millones, lo que excede el número de especies de organismos pluricelulares en varios órdenes de magnitud.

Hay una especie de arquea en el suelo oceánico que presenta muchos de los caracteres que cabría esperar de la célula hospedante que se fundió con una bacteria para convertirse en la primera eucariota. Las arqueas, como las bacterias gram-positivas, poseen solo una membrana. Pero la membrana de las arqueas consta de lípidos diferentes de los que componen la membrana bacteriana. La envoltura de las arqueas tiene también una red cristalina de proteínas. Las arqueas poseen su propio apéndice para nadar, que evolucionó de forma independiente del flagelo bacteriano.

Los microorganismos eucariotas pueden ser células de vida libre con compartimentos complejos o animales. Las células eucariotas, aunque mayores que las bacterianas y que las arqueas, son también imperceptibles sin auxilio del microscopio. Su información genética se organiza en cromosomas almacenados en un núcleo cerrado por una membrana. La energía celular se produce en las mitocondrias. Las proteínas y otros metabolitos celulares se distribuyen a lo largo de una red de discos membranosos y aplanados, incluido el retículo endoplasmático y el aparato de Golgi.

Nuestro mundo ha sido conformado por un mundo invisible. Los microorganismos intervienen en todos los ciclos importantes de los elementos y han desempeñado un papel definitivo en el desarrollo del planeta. Entre sus logros, son productores primarios fotosintetizadores que utilizan luz solar, agua y dióxido de carbono para formar la base de la cadena trófica y, junto con plantas, crear la fuente más extensa de biomasa. Las primeras formas de vida de nuestro planeta fueron enteramente microbianas. Si hay vida en otros planetas, incluirá a buen seguro a estos pequeños y fascinantes seres.

—*Luis Alonso*



VIDA 3.0
SER HUMANO EN LA ERA DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL
Max Tegmark
Taurus, 2018

Máquinas inteligentes: ¿un nuevo estadio vital?

Claves para entender el impacto de una revolución que ya está en marcha

Nos encontramos en la aurora de una nueva era. Lo que antaño pertenecía al dominio de la imaginación se está haciendo realidad merced a la inteligencia artificial, la cual está transformando la ciencia, la técnica, el derecho, el trabajo, la sociedad e incluso el significado de lo genuinamente humano. Por encima de cualquier otro logro, la inteligencia artificial encierra potencial para revolucionar nuestro futuro colectivo.

Uno de los pioneros en la investigación sobre las repercusiones de la inteligencia artificial es el autor de este libro, cofundador del Instituto del Futuro de la Vida y profesor de física en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. El centro, dedicado a mejorar el futuro a través de la técnica, investiga sobre los riesgos existenciales a los que se enfrenta la humanidad. Ha recibido subvenciones millonarias de filántropos como Elon Musk para estudiar, en particular, la seguridad de la inteligencia artificial, sobre la que ha publicado una lista de principios esbozados por investigadores y pensadores como el propio Musk, Stephen Hawking, David Chalmers, Sam Harris, Donald Knuth y Ray Kurzweil.

En *Vida 3.0*, Tegmark se ocupa de la evolución de la inteligencia artificial. En nuestro dominio de las máquinas superinteligentes se cifra la clave de que la vida siga floreciendo en los próximos miles de millones de años en el universo. Para él, la vida es un sistema autorreplicante de procesamiento de la información. Y, lo mismo que nuestro universo, la vida fue ganando en complejidad e interés. Al hilo de estas reflexiones, Tegmark clasifica la vida en tres niveles de complejidad: 1.0, 2.0 y 3.0.

En la Tierra, la vida apareció hace 3800 millones de años. Durante largo tiempo, nuestro planeta abundó en formas de vida. Las más exitosas dejaron fuera de competencia al resto y aprendieron a reaccionar ante los cambios del entorno. Para ello necesitaron procesar información procedente del medio. Muchas bacterias, por ejemplo, poseen un «sensor» que les permite medir la concentración de azúcar en el líquido circundante; al mismo tiempo, nadan sirviéndose de flagelos. El *hardware* que asocia el sensor a los flagelos ejecuta un algoritmo sencillísimo: si detecta una concentración de azúcar inferior a la de hace un par de segundos, el organismo invierte la rotación de los flagelos y cambia su sentido de movimiento. Tales bacterias ejemplifican la vida 1.0, ya que ni su *hardware* ni su *software* han sido diseñados, sino que han evolucionado. En este estadio, la vida solo posee replicación, y la adaptación solo se da a través de la evolución.

El ser humano representaría la vida 2.0: el estadio cultural. Su *hardware* ha evolucionado, pero el *software*, en buena medida, ha sido objeto de diseño. Por *software* se entiende aquí todos los algoritmos y conocimientos que empleamos

para procesar la información procedente de los sentidos y tomar decisiones. Los humanos somos capaces de aprender, de adaptarnos a entornos cambiantes y de alterar dichos entornos. Sin embargo, no podemos modificarnos físicamente a nosotros mismos. La capacidad de la vida 2.0 para diseñar su propio *software* la dota de mayor inteligencia que la alcanzada por la vida 1.0. Una inteligencia que requiere cantidades ingentes de *hardware* (hecho de átomos) y de *software* (hecho de bits). Este estadio de la vida es también más flexible que el precedente, pues puede adaptarse casi de inmediato con una «actualización del *software*». Fue esa flexibilidad la que permitió a la vida 2.0 dominar la Tierra.

Si la vida 1.0 corresponde al estadio biológico y la 2.0 al cultural, la vida 3.0 nos lleva al estadio tecnológico, en el que se diseñan tanto el *hardware* como el *software*. La vida 1.0 comenzó su andadura sobre la Tierra hace unos 3800 millones de años; la vida 2.0 lo hizo hace unos 100.000 años, y muchos piensan que la vida 3.0 podría asentarse la centuria próxima [*véase* «Moldeados por la tecnología», por Ricard V. Solé; Investigación y Ciencia, noviembre de 2016].

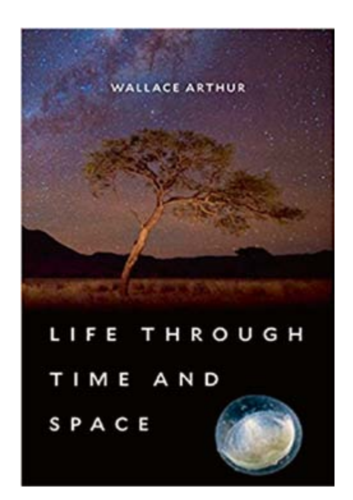
En ese futuro, la inquisición sobre la consciencia ocupará un puesto central. De estar confinada a los límites de la especulación filosófica y ser considerada ajena al mundo de la ciencia, la consciencia se ha vuelto condición *sine qua non* para cualquier teoría del todo que se precie. De ahí la función nuclear que desempeña en *Vida 3.0*, cuyo texto corona. Detengámonos brevemente en ella.

Buena parte del debate actual se centra en la consciencia fenoménica. Por tal se entiende el concepto subjetivo que uno tiene de sí mismo, la sensación de ser algo peculiar. Los fenómenos o acontecimientos que podemos calificar de conscientes son los que podemos exponer, recordar, aquellos a los que podemos ofrecer una respuesta emotiva, convertir en nuestros objetivos o los que nos ayudan a tomar decisiones. Deben ser, pues, accesibles para un amplio espectro de estados mentales diferentes, sistemas y facultades. Afirmar que la reflexión constituye un proceso consciente es declarar que sus contenidos son globalmente accesibles.

Los avances en neurociencia, conectómica y técnicas de formación de imágenes han arrojado luz sobre las bases celulares y moleculares del comportamiento de organismos muy dispares. ¿Cómo se produce el paso de los estados neuronales del cerebro a los estados fenoménicos de la consciencia? De acuerdo con el texto clásico de Nagel, ¿cómo siente un murciélago que es murciélago? ¿Cómo sabe el pez el rango social que ocupa? Son múltiples las explicaciones del contenido de la consciencia. Para asentar cualquier hipótesis y teoría se exige el modelo animal, el método experimental y la técnica de neuroimagen idóneos; sin desechar la introspección, cuya precisión depende de la región cerebral implicada.

¿Y la teoría de la información? Cuatro son las condiciones necesarias que debe cumplir el proceso de información para considerarlo consciente: un sistema consciente posee una capacidad sustancial de almacenamiento de información (principio de la información); tiene una capacidad sustancial de procesamiento de la información (principio dinámico); tiene independencia sustancial del resto del mundo (principio de independencia), y no puede constar de partes independientes (principio de integración). Al respecto, cobra interés la tesis de Giulio Tononi sobre la consciencia y su idea de la información integrada, magnitud que mediría el conocimiento mutuo entre las partes componentes de un sistema [*véase* «Consciencia artificial», por Christof Koch y Giulio Tononi; Investigación y Ciencia, agosto de 2011]. Tegmark entiende la consciencia como un fenómeno emergente, con propiedades más allá de las características de las partículas elementales.

—Luis Alonso



LIFE THROUGH TIME AND SPACE
Wallace Arthur
Harvard University Press, 2017

La vida y el cosmos

Una audaz reflexión sobre los orígenes de la vida en la Tierra y su posible existencia en otros rincones del universo

Cuando se habla del origen extraterrestre de la vida, se alude por lo común a moléculas precursoras de lo que pudo ser la sopa inicial de la que emergieron los primeros aminoácidos, bases nucleotídicas o lípidos que conformaran una protomembrana. Los objetos preferidos eran los meteoritos. Más recientemente, en 2017, se ha descubierto un nuevo vivero: las nubes protoplanetarias de polvo y gas que rodean a las estrellas jóvenes. Dos equipos de científicos detectaron signos de isocianato de metilo, una molécula prebiótica, en las nubes que rodean a dos estrellas de tipo solar de formación reciente. Usando datos del Observatorio de Atacama, en Chile, los investigadores hallaron que un joven sistema multiestelar, IRAS 16293-2422, emitía múltiples líneas espectrales características de este compuesto. El isocianato de metilo forma enlaces peptídicos que mantienen unidos los aminoácidos en las proteínas [*véase* «El origen astroquímico de los sistemas planetarios y la vida», por Rafael Bachiller; Investigación y Ciencia, abril de 2015].

Wallace Arthur, biólogo de profesión y astrónomo de afición, opta por un planteamiento más apriorístico en *Life through time and space*, lo que no significa menos riguroso. El libro versa sobre nuestro origen, nuestro destino, nuestro lugar en el universo y la verosimilitud de vida inteligente en el cosmos. Escrito en una serie de siete tripletes de capítulos, se

NOVEDADES

Una selección de los editores de **INVESTIGACIÓN Y CIENCIA**





CULTIVOS TRANSGÉNICOS

Colección *¿Qué sabemos de...?*
José Pío Beltrán
Editorial CISC, 2018
ISBN: 978-84-00-10312-5
126 págs. (12 €)



EL GRAN ESPECTÁCULO DEL CIELO
OCHO VISIONES DEL UNIVERSO DESDE LA ANTIGÜEDAD A NUESTROS DÍAS

Marco Bersanelli
Ediciones encuentro, 2018
ISBN: 978-84-9055-933-8
272 págs. (24 €)



EL NAUFRAGI DELS RECORDS
QUÈ HI HA DARRERE DE MALALTIES COM L'ALZHEIMER?

Jaume Folch
Edicions Universitat de Barcelona, 2018
ISBN: 978-84-9168-060-4
228 págs. (16 €)



¡QUE LAS MATEMÁTICAS TE ACOMPAÑEN!

Clara Grima
Ariel, 2018
ISBN: 978-84-344-2784-6
312 págs. (18,90 €)



EN BUSCA DEL ORIGEN PERDIDO
UN RECORRIDO DE CASI 4000 MILLONES DE AÑOS POR LA HISTORIA DE LA VIDA EN LA TIERRA

Alba Vicente, Ferran Llorens
y Àngel H. Luján
Paidós, 2018
ISBN: 978-84-493-3439-9
288 págs. (16,95 €)



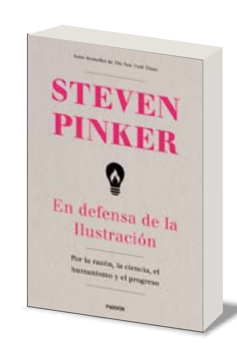
¿QUÉ ES COMER SANO?
LAS DUDAS, MITOS Y ENGAÑOS MÁS EXTENDIDOS SOBRE LA ALIMENTACIÓN

José Miguel Mulet
Destino, 2018
ISBN: 978-84-233-5403-0
272 págs. (17,90 €)



LA REVOLUCIÓN DE LAS CÉLULAS MADRE
REALIDAD, POTENCIAL Y LÍMITES DE LAS 'ESTRELLAS' DE LA BIOLOGÍA ACTUAL

David Díaz López
Ediciones Cálamo, 2018
ISBN: 978-84-16742-08-0
168 págs. (17,50 €)



EN DEFENSA DE LA ILUSTRACIÓN
POR LA RAZÓN, LA CIENCIA, EL HUMANISMO Y EL PROGRESO

Steven Pinker
Paidós, 2018
ISBN: 978-84-493-3462-7
744 págs. (32 €)

repite en cada uno de ellos la misma secuencia temática: astronomía, evolución y embriología. La lógica subyacente no es, ni mucho menos, evidente.

Sea, por ejemplo, el triplete titulado «De las estrellas a los embriones». Este presenta un primer capítulo astronómico sobre la observación de las galaxias; un segundo evolutivo dedicado a *Homo habilis*, y un tercero embriológico en torno al desarrollo del cerebro. Arranca de una hipótesis sacada, diríase, del ámbito de la fantasía científica: la existencia de habitantes de Andrómeda (posibilidad que el autor cree real).

Para distinguir la galaxia de Andrómeda en el firmamento, atendamos a un grupo de cinco estrellas brillantes que conforman una W. Se trata de la constelación de Casiopea, una de las más conspicuas del cielo nocturno del hemisferio norte. La galaxia de Andrómeda se encuentra entre esta y la constelación homónima. Consta de cientos de miles de millones de estrellas. Sabemos que en torno a la mayoría de los soles de una galaxia orbitan planetas, algunos de los cuales serán semejantes a la Tierra. Supongamos que en alguno de ellos hay vida inteligente.

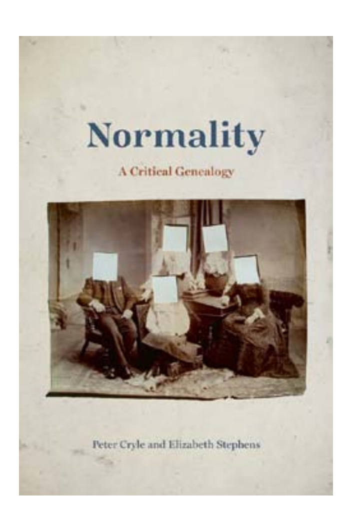
Imaginemos ahora que la potencia de sus telescopios les permite no solo divisar la Tierra, sino también los individuos que la habitan. La galaxia de Andrómeda se encuentra a unos 2,5 millones de años luz. Por tanto, los andromeditas que observaran la Tierra hoy no nos verían a nosotros, sino a los protohumanos que nos precedieron, quizá de la especie *Homo habilis*, con un cerebro de entre 500 y 800 centímetros cúbicos.

En cuanto humanos, nuestro cerebro es inexistente al comienzo del desarrollo. En sus fases iniciales, el embrión humano no solo carece de cerebro, sino también de células nerviosas. El óvulo fecundado no posee aún indicios de sistema nervioso. Tampoco los tiene el embrión que ya cuenta con un centenar de células. Tras una proliferación celular, por fin aparece a lo largo de la línea media dorsal un precursor de nuestro sistema nervioso central. Después de diversos procesos, este adquiere una configuración tubular: el tubo neural, que formará el cerebro en la cabeza y el cordón espinal a lo largo del cuerpo.

El cerebro humano constituye, sin duda, la pieza material mejor organizada del sistema solar. Por supuesto, más que cualquier otro cerebro animal, por no hablar del sistema de anillos y lunas de Saturno. Pero la naturaleza de un sistema y otro es diferente. Los humanos hemos tendido a considerarnos en el pináculo de la materia viva, el centro del universo. Pero, desde Copérnico, sabemos que no lo somos. Si existe una inteligencia alienígena, a buen seguro no se encontrará en el centro de las estrellas ni en el espacio interestelar, sino que habremos de buscarla en planetas semejantes al nuestro [*véase* «(In)trascendencia cósmica», por Caleb Scharf; Investigación y Ciencia, marzo de 2015].

La audacia intelectual del autor le lleva a proponer una curiosa interpretación de la explosión del Cámbrico. No habría constituido tanto un acto creador de filos y especies, de acuerdo con la interpretación habitual, sino de intensa fosilización. ¿Qué tipos de fósiles habría hace 550 millones de años? En su mayoría pertenecerían a la biota ediacárica, así llamada por las colinas de Ediacara, al sur de Australia, donde se descubrieron. Los organismos correspondientes tomarían una forma indescifrable: potentes (hasta de un metro) y, sin duda, multicelulares. Unos parecerían animales (gusanos segmentados) y otros vegetales. Arthur aventura que incluso tal vez no fueran ni lo uno ni lo otro, sino que quizá pudieran haber pertenecido a un reino multicelular hoy extinto.

—Luis Alonso



NORMALITY
A CRITICAL GENEALOGY
Peter Cryle y Elizabeth Stephens
University of Chicago Press, 2017

¿Qué es ser «normal»?

Entre la medicina y las matemáticas: de cómo la asociación entre lo ideal y lo común acabaría generando conceptos de identidad viciados

En Bengkala, un pueblo de la isla indonesia de Bali, ha subsistido durante generaciones un tipo hereditario de sordera. Si bien tan solo afecta a una pequeña parte de la población, todos conocen el lenguaje de signos y los matrimonios tienen lugar con independencia de si uno o ambos miembros de la pareja pueden oír o no. Es normal comunicarse por signos y fraternizar en los dos lenguajes. En muchos sentidos, es normal ser sordo. En cualquier población, lo atípico puede convertirse en regla si se produce con la frecuencia suficiente.

En *Normality*, Peter Cryle y Elizabeth Stephens analizan el concepto de normalidad instigado en el siglo xx por los filósofos Georges Canguilhem y Michel Foucault, y ampliado después por los estudios de raza, la teoría *queer* y el debate sobre los derechos de las personas con discapacidad. Cryle y Stephens introducen una precisión necesaria al analizar la distinción entre normal como «común» y normal como «el ideal al que todos debemos aspirar», y señalan las consecuencias reales —desde la eugenesia hasta la heteronormatividad o el genocidio— de este concepto.

Su ambiciosa obra analiza la emergencia del pensamiento estadístico desde el siglo xviii en adelante, la relación entre lo cualitativo y lo cuantitativo, y los modos en que la normalidad ha constituido un escenario de control social. Analizan la aparición casi simultánea de este término en matemáticas y en medicina durante el siglo xix; y rastrean su ingreso en la cultura popular a mediados del siglo xx,

cuando se convirtió en una herramienta para aquellos que, con intereses comerciales, buscaban estandarizar los bienes producidos en masa. Los autores toman en consideración la diferencia entre las mediciones estadísticas y el lenguaje de superioridad moral.

Su lenguaje oscila entre lo culto y lo oculto, con virajes hacia el áspero estilo académico. Pero sus pruebas, escrupulosamente recabadas, demuestran que la normalidad siempre ha estado plagada de contradicciones internas. Así pues, Cryle y Stephens presentan la etimología y la genealogía de una palabra, la historia de una idea, la lingüística cultural a través de la cual esas hebras se han entrelazado y las ramificaciones sociológicas de esas subjetividades.

El libro, que abarca los dos últimos siglos, sigue una estructura cronológica que nos presenta a los principales ideólogos de la normalidad. Entre ellos, el zoólogo Isidore Geoffroy Saint-Hilaire, quien estudió la anormalidad anatómica en humanos y otros animales; el estadístico Adolphe Quetelet, teórico del «hombre promedio»; el criminólogo Cesare Lombroso; el eugenista Francis Galton; el fundador del psicoanálisis Sigmund Freud; y los sexólogos Richard von Krafft-Ebing, quien formuló el concepto de «perversidad», y Alfred Kinsey, quien lo cuestionó.

Entretejidos con estas biografías intelectuales encontramos el nacimiento de la medicina moderna, el estudio de la anormalidad congénita, los fundamentos y aplicaciones de la estadística, la crueldad de la eugenesia, el advenimiento de la psiquiatría moderna y los balbuceos de la revolución sexual.

En medicina, el concepto de normalidad se refiere a lo ideal: órganos y tejidos en óptimo funcionamiento. En matemáticas alude a la situación en la que los datos tienden a agruparse en torno a un punto central dentro de un abanico de valores posibles. De este modo, aspiramos a una presión sanguínea normal porque constituye un requisito para encontrarnos sanos, pero también a una sexualidad normal por las presiones del convencionalismo social.

Fue a comienzos del siglo xx, momento en que el ideal médico se cruzó con la idea matemática, cuando se empezó a asociar lo típico con lo óptimo. Cryle y Stephens describen la manera en que el término *normal* cambió de significado y cómo formar parte de la media estadística se convirtió en una aspiración [*véase* «¿Qué significa estar sano o enfermo?», por Cristian Saborido; Investigación y Ciencia, enero de 2018].

El mundo de la medicina se resistió durante largo tiempo a lo cuantitativo. A principios del siglo xix, quienes apoyaban incorporar los números al «arte» de la medicina, como Quetelet, fueron criticados por ello; algo que en nuestra época de medicina de precisión y sanidad basada en macrodatos nos parecería inverosímil. Y aunque las mediciones cuantitativas han contribuido a mejorar la medicina, también han sido fuente de usos preocupantes, ya que se usaron para fundamentar las pseudociencias de la frenología y la craneometría, desarrolladas a su vez para justificar el racismo.

La idealización del promedio, que se convierte en opresiva para los representantes de la diversidad, constituye una crueldad que explota la retórica de la normalidad. Sin embargo, vilipendiarlo condujo a la eugenesia: Galton se sirvió de las matemáticas para teorizar que la estabilidad social requería fomentar la reproducción de quienes se encontraban por encima del promedio y suprimirla entre quienes se hallaban por debajo.

Cryle y Stephens explican que, en 1945, el periódico de Cleveland *The Plain Dealer* buscó a la mujer promedio perfecta. Concedió finalmente el dudoso premio a una tal Martha Skidmore, al tiempo que admitía que no representaba exactamente dicha media. No en vano, prácticamente nadie puede asociarse a esta condición. Por tanto, y como bien apuntan los autores, lo normal resulta paradójico.

Alfred Binet, uno de los padres de las pruebas de inteligencia, observó que «nadie sabe cuánta inteligencia necesita un niño para ser normal». Es esta misma labilidad, argumentan los autores, lo que puede reforzar el poder de lo normal, dado que las personas intentan constantemente acercarse a ello. Con todo, no deja de ser una construcción moderna. Hay normas que proceden tanto de la ciencia válida como de la engañosa, así como de la sociedad, y quienes se desvían de ellas son «anormales».

La tensión entre lo cualitativo y lo cuantitativo se convierte así en la narrativa central del libro. La predominancia de lo normal forma parte de la evolución general hacia la estadística, hacia la tendencia a dictar el comportamiento humano cuantificándolo. Es la historia de cómo la visión panorámica, compuesta de datos numéricos agregados, reemplazó en muchos contextos a la profundidad narrativa, basada a menudo en la anécdota. El engaño puede darse tanto en las matemáticas como en la narrativa, pero ambas tienen valor y ninguna de ellas puede ni debe reemplazar a la otra.

Cryle y Stephens describen *Middletown*, el estudio realizado en 1929 por Robert Lynd y Helen Merrell Lynd que estableció la idea de la «América profunda» (*Middle America*), entidad canonizada en un momento de diversidad creciente, generada en buena parte por la inmigración. A través de esos trabajos, la antropometría se filtró desde las cárceles y los hospitales hasta el mundo académico, lo que a su vez permitió que lo «normal» se abriera paso en la vida pública.

Con todo, fue el *Grant study* de Harvard, una gran investigación longitudinal comenzada en 1938 con la participación de 268 estudiantes universitarios varones, lo que definió la normalidad en el sentido moderno, sirviéndose de datos médicos y estadísticos. En 1945 se publicaron de modo simultáneo descripciones de dicho estudio en el popular *Young man, you are normal* («Jovencito, eres normal»), de Earnest Hooton, y en *What people are* («Lo que la gente es»), de Clark Heaths, lo que sistematizó la idea en el lenguaje corriente y en el ámbito académico.

El último capítulo aborda los estudios de mediados de siglo sobre el comportamiento sexual humano conocidos como «Informe Kinsey». Aquí lo cualitativo se disfraza de cuantitativo y se utiliza un sistema de tarjetas perforadas para estandarizar historias que, de hecho, son complejas, sutiles y difíciles de cuantificar. Aunque pretendía ser radical, contribuyó de manera más que incidental a la hegemonía de la normalización en los años cincuenta.

Cryle y Stephens recuerdan que esa época de postguerra fue un período de «mercadotecnia de masas y encuestas públicas, autoayuda y cultura del consumo. [...] Esa normalidad no surgió de las cárceles, sino de las oficinas y los hogares residenciales». No fuimos nosotros quienes dictamos los valores de la industria y la tipificación, pero acabamos sometiéndonos a ellos. Quienes nos midieron nos hicieron como somos.

—Andrew Solomon
Centro Médico de la Universidad de Columbia
Nueva York

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

AGOSTO


1968


1918


1868

1968

Agua respirable

«Si por algún raro dispositivo pudiera hacerse que el hombre respirara agua en vez de aire, podrían vencerse los importantes obstáculos que suponen los intentos de descender en lo profundo de los océanos y de viajar al espacio. Supóngase que preparamos una solución isotónica de composición salina similar al plasma sanguíneo y que esa solución la cargamos de oxígeno a presión superior a la normal. ¿Podría respirarla un mamífero? Los primeros experimentos los realicé con ratones en 1961 en la Universidad de Leiden. Tras la agitación inicial, los animalitos se calmaron y no parecían sufrir ningún trastorno especial. Sus movimientos respiratorios eran lentos y rítmicos, y parecían inhalar y exhalar el líquido. Se hizo evidente que el factor decisivo que limitaba la supervivencia de los ratones no era la falta de oxígeno, sino la dificultad para eliminar el dióxido de carbono al ritmo adecuado. —Johannes A. Kylstra»

1918

Edemas en tiempos de guerra

«El doctor F. S. Parks, de Toronto, ha estado prisionero en un campo alemán en Meiden, donde ejerció durante 18 meses entre sus miles de camaradas. Muchos de ellos padecían edema o hidropesía de guerra, la enfermedad predominante con mucho en aquel campo. Las raciones de alimentos, junto con un trabajo duro, la exposición a los elementos y un entorno deprimente, eran las causas de la hidropesía que se expandió sobre todo en la primavera y principios de verano de 1917, cuando aquellas raciones se hicieron del todo insuficientes. Era una dieta muy baja en proteínas (alimento generador de los tejidos orgánicos) y prácticamente carente de grasas. Se componía casi solo de sopa, por lo que para conseguir una mínima cantidad de nutrientes había que ingerir mucho líquido. El líquido extra resultaba excesivo para su eliminación por corazones débiles y unos riñones sobrecargados. Y de ahí aquella hidropesía, la anasarca.»

Nogales para la lucha

«Se necesitan más nogales americanos para hélices de avión y cajas de fusil. Durante su prueba de cuatro años en esta guerra, esta madera se ha mostrado como el mejor de los materiales para la manufactura de los mencionados productos. El Gobierno necesita cuanto nogal pueda conseguirse. “Luche con sus nogales” es el eslogan de la Sección de Maderas Duras, del Departamento de Producción Aeronáutica, y de la Sección de Armas Ligeras, del Ministerio de Material de Guerra. Cada árbol importa.»

1868

La primera fiebre ciclista

«En un plazo de pocos meses, el vehículo conocido como velocípedo ha recibido un insólito grado de atención, especialmente en París, ciudad en la que se ha convertido en un medio locomoción favorito y a la moda. Desde luego el ciclista “se trabaja su camino”, pero el esfuerzo es menor que el de andar, mientras que el ejercicio muscular es tan sano como vigorizante. Hace pocos años, esos vehículos se usaban solo como juguetes para los niños, y no ha sido hasta hace poco cuando se han comprendido y reconocido sus posibilidades. El grabado representa uno de los empleados por los famosos Hermanos Hanlon (una compañía de acróbatas) en sus exhibiciones públicas.»



1868: Las bicicletas estuvieron de máxima moda, aunque por poco tiempo.

Una teoría sobre la rabia

«Es costumbre considerar que el verano tiende a favorecer el aumento de la hidrofobia, y así se toman más precauciones para evitar ese peligro, confinando a los perros y poniéndoles bozales, si es que no son sumariamente sacrificados. La práctica de matar a los canes con la llegada del calor del verano data de antiguo, y se aplica bajo la sanción de la costumbre. Hay quienes, empero, han expresado la opinión de que los perros no son vulnerables a los ataques de rabia en esta estación más que en cualquier otra. Si, como se ha afirmado, esta terrible enfermedad la origina la excitación consecuente del instinto sexual insatisfecho de los machos, cuesta comprender de qué modo el excesivo calor de julio y agosto dejará de agravar tal excitación.»

Edad del Bronce

«Afirma el señor Thomas W. Kingsmill, secretario de la rama de China septentrional de la Real Sociedad Asiática, que el uso del bronce para la talla de instrumentos sigue predominando en China y Japón. Según él, “es un hecho que en esos dos países, hasta hoy en plena Edad del Hierro, resulta habitual el uso del bronce para tallar instrumentos, sea solo o combinado con acero. En la provincia de Cantón, puede verse a todos los colegiales con una navaja plegable hecha con una especie de bronce, cachas, resorte y hoja todos de ese material. Para formar el filo, en la hoja de bronce se incrusta una delgada pieza de acero; pero no son raras las navajas hechas por completo de bronce, y a veces adornadas y robladas con cobre”.»

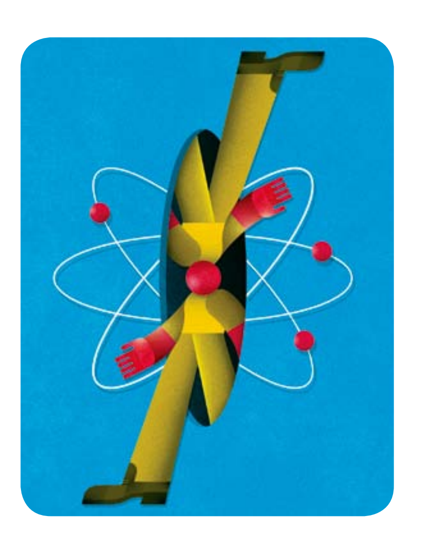
SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. XIX, N.º 8, 19 DE AGOSTO DE 1868

FÍSICA

Cruzar la frontera cuántica

Tim Folger

La mecánica cuántica dicta que el universo es probabilístico; sin embargo, nuestra realidad macroscópica parece determinada. Nuevos experimentos investigan dónde —y por qué— se pasa de un dominio al otro.



SALUD PÚBLICA

La lucha contra los mosquitos

Dan Strickman

Ante la extensión de las enfermedades transmitidas por mosquitos, los científicos ensayan nuevas sustancias tóxicas, trampas y técnicas de ingeniería genética para hacerles frente.

MATERIALES

Viaje a un universo de dos dimensiones

José Baldoví y Ángel Rubio

Más de una década después del aislamiento del grafeno, los materiales bidimensionales no han dejado de sorprendernos.

EVOLUCIÓN

La auténtica paleodieta

Peter S. Ungar

El análisis del microdesgaste de los dientes fósiles nos señala de qué se alimentaban nuestros antepasados y nos proporciona información sobre la forma en que el clima influyó en la evolución humana.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Bruna Espar Gasset
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Mariana Lombardo
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN
EDITOR IN CHIEF AND SENIOR VICE PRESIDENT
Mariette DiChristina
PRESIDENT Dean Sanderson
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek

Difusión controlada

DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158
para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Prensa Científica, S. A.
Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros
El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO
Asesoramiento y traducción:
Javier Grande: *Apuntes, La vida secreta del Sol, Mirar hacia las estrellas, ¿Qué es el espaciotiempo?, ¿Qué es la materia oscura? y El misterio de la arena electrizante*; Elisa Vilaret: *Apuntes*; Andrés Martínez: *Apuntes*; Miguel Ángel Vázquez Mozo: *La carga débil del protón*; Pedro Pacheco González: *Cuando las diferencias sexuales llevan a la extinción*; Marián Beltrán: *Sobreestimular a los bebés, Los cautivos que cambiaron el mundo y ¿Qué es ser normal?*; Clara Florensa y Xavier Roqué: *Guerra, mujeres y ciencia*; Gonzalo Claros: *¿Qué es la consciencia? y ¿Cómo nació la vida?*; José Óscar Hernández Sendín: *¿Cuáles son los límites de la manipulación de la naturaleza? y ¿Cuánto podemos saber?*; Blanca Álvarez: *La placenta, el primer órgano del bebé*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. de Caldes, km 3
08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España